

## Kurzbeschreibung zum FuE-Projekt

Reg.-Nr.: 368/01

Kurztitel: Verfahren zur Bewertung von Abdeckschichten

Laufzeit: 01.01.2001 bis 30.06.2003

<b>Name und Anschrift der Forschungsstelle</b> Kali-Umwelttechnik Sondershausen GmbH (K-UTEC) Am Petersenschacht 7 99706 Sondershausen
<b>Kurzfassung (Problemstellung, Ergebnis, Schlussfolgerungen/wirtschaftliche Bedeutung)</b> <p>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.</p> <p>Neben der Eignung der Abdeckschichtmaterialien bezüglich umweltrelevanter Inhaltstoffe sind gleichzeitig geotechnische und pflanzenphysiologische Eigenschaften zu gewährleisten. Diese lassen sich einordnen in die Kategorien Standsicherheit, Wasserspeichermöglichkeit und Durchwurzelbarkeit, für die die Entwicklung von Bewertungsverfahren vorgesehen ist.</p> <p>Gegenstand des FuE-Vorhabens ist es, für in Abdeckschichten zu verwertende Abfälle und/oder Abfallmischungen Bewertungsverfahren zu entwickeln, die es gestatten, die relevanten Eigenschaften einfach und sicher zu vertretbaren Kosten bestimmen zu können. Grundlage hierfür ist eine Validierung der vorhandenen Verfahren und deren experimentelle/kleintechnische Untersuchung an ausgewählten Abfallarten und schon bestehenden Abdeckschichten. Daraus wurden geeignete aussagekräftige Parameter abgeleitet, die es ermöglichen, die geotechnischen und pflanzenphysiologischen Eigenschaften von Abdeckschichtmaterialien bzw. der Schichten selbst zu prognostizieren.</p> <p>Im Zeitraum vom 01.01.2001 bis 30.06.2003 wurden folgende Arbeitspakete bearbeitet:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- AP 1 Grundlagenuntersuchungen</li><li>- AP 2 Felduntersuchungen</li><li>- AP 3 Geotechnische Untersuchungen</li><li>- AP 4 Pflanzenphysiologische Untersuchungen</li><li>- AP 5 Klassifizierung und Systematisierung der Materialgruppen</li><li>- AP 6 Entwicklung eines Monitoringsystems für Abdeckschichten</li><li>- AP 7 Feldversuche</li><li>- AP 8 Zusammenfassung</li></ul> <p>Die Kostenplanung konnte vom Grundsatz her eingehalten werden. Die Zeitplanung wurde aufgrund personeller Umbesetzungen den neuen Gegebenheiten angepasst.</p> <p>Seitens des Bewilligungsempfängers ist einzuschätzen, dass der erreichte FuE-Stand den Erwartungen entspricht und der Mittelaufwand der Verhältnismäßigkeit entsprach.</p>
<b>Verbundene Industriepartner, Ergebnistransfer in kleinere und mittlere Unternehmen</b> -
<b>Veröffentlichungen/Patente</b> -

Sondershausen, den 05.11.2003

-----  
Franziska Koch  
Projektleiterin

-----  
Dr. Marx  
Geschäftsführer

## **Sachbericht zum FuE-Vorhaben:**

Entwicklung von Bewertungsverfahren für  
geotechnische und pflanzenphysiologische  
Eigenschaften von Abdeckschichten

**Reg.-Nr.:** 368/01

**Kurztitel:** Verfahren zur Bewertung von  
Abdeckschichten

Sondershausen, den 05.11.2003

-----  
Franziska Koch  
Projektleiterin

Firmenstempel

## 1 Gegenstand des FuE-Vorhabens

Die Herstellung von Bodenersatzstoffen für Abdeckschichten bei der Rekultivierung als Form der Altlastensanierung/-sicherung und für Bauvorhaben als Form der Verwertung von Abfällen hat sich zu einem nicht unbeträchtlichen Wirtschaftsfaktor entwickelt.

Das Aufbringen von Abdeckschichten ausreichender Wasserspeicherefähigkeit in der Deponierekultivierung, dem Böschungsbau an Verkehrswegen und der biologischen Versiegelung von Altlasten (z. B. den großen Kali-Rückstandshalden in Nordthüringen) und deren wasserzehrenden Begrünung führt zu einer entscheidenden Verminderung des Eindringens meteorotrop induzierter Wässer in die unterlagernden Schichten. Das heißt, die Abdeckschichten mit ihren stofflichen Eigenschaften und technisch-technologischem Aufbau besitzen neben landschaftsgestalterischen Aspekten grundsätzliche ökologische Funktionen, wobei wirtschaftliche Randbedingungen zu berücksichtigen sind.

Neben der inhaltstofflichen Eignung der Abdeckschichtmaterialien bezüglich umweltrelevanter Inhaltstoffe sind für die o. g. Funktionalitäten gleichzeitig geotechnische und pflanzenphysiologische Eigenschaften zu gewährleisten. Diese lassen sich einordnen in die Kategorien

- Standsicherheit,
- Wasserspeicherefähigkeit und
- Durchwurzelbarkeit,

für die die Entwicklung von Bewertungsverfahren vorgesehen ist.

Nachfolgend sollen die Zielstellungen vorwiegend am Beispiel der Rekultivierung von Kali-Rückstandshalden dargestellt werden. Ein prinzipielle Übertragbarkeit bzw. Anwendung/Ausweitung auf die Deponierekultivierung und den Böschungsbau für Verkehrswege ist Bestandteil des Vorhabens.

In Nordthüringen gibt es sechs große Rückstandshalden des ehemaligen Kalibergbaus an den Standorten:

- Sondershausen,
- Bleicherode,
- Bischofferode,
- Sollstedt,
- Volkenroda und
- Roßleben.

Weitere Halden befinden sich an Standorten in Niedersachsen. Kennzeichnend für die Halden sind Hanghöhen von bis zu 100 m und Hangneigungen von über 40°, also erheblich vergrößerte Dimensionen gegenüber Deponien und Verkehrswegen.

Aus diesen Halden werden auch nach der Produktionseinstellung noch erhebliche Mineralsalzmengen niederschlagsinduziert aufgelöst. Diese hochkonzentrierten Salzlösungen gelangen teils über oberflächennahe Ausbreitungsvorgänge direkt, d. h. ungesteuert in die Vorfluter bzw. das oberflächennah anstehende Grundwasser, teils werden am Haldenfuß fassbare Sickerlösungen über Stapelsysteme gesteuert in die Vorflut abgegeben. Eine Ausnahme bildet die Halde Volkenroda, von der alle Salzlösungen gefasst und zur Verwahrung der ehemaligen Kaligrube verwendet werden.

Im Rahmen des Pilotprojektes Bleicherode "Entwicklung des Verfahrens zur Rekultivierung von Kalialthalden" sowie weiterführender Untersuchungen an Lysimeteranlagen konnte nachgewiesen werden, dass durch biologische Versiegelung mittels Überdeckung und Begrünung der Halden, d. h. durch Überdecken mit speicherfähigem Boden und einer wasserverbrauchenden Begrünung, das Versickern von Niederschlägen und damit die Salzlösungsbildung weitgehend gemindert wird. Versickerungsverminderungen um 80 % dürften damit erreichbar sein.

Allein in Nordthüringen werden zur Zeit jährlich rund 1,5 Millionen Tonnen Abfälle verwertet. Ein Verwertungszeitraum von 20 - 30 Jahren ist geplant. Die Überdeckung muss langzeitstandsicher und ökologisch verträglich gestaltet werden. Offene Fragen ergeben sich zu standsicherheitsgefährdenden Auslösungen von Rückstandssalz in Verbindung mit Niederschlägen bei differierender Gestaltung der Abdeckschichten und damit verbundenem Nachbrechen der Abdeckschichten sowie steilen Hangbereichen (Steigung 1 : 1,5), die ca. 75 % der Gesamtfläche ausmachen.

Dabei erfolgt die Rekultivierung der Kali-Rückstandshalden kommerziell. Das heißt, die Minimierung der ökologischen Folgen hat eine wirtschaftliche Basis.

Die technischen, technologischen und organisatorischen Rahmenbedingungen hierfür sind in der Kali-Haldenrichtlinie des Freistaates Thüringen [1] festgelegt. Für Deponien bzw. Verkehrswege werden im allgemeinen die Zuordnungswerte nach der LAGA-Mitteilung 20 angewendet.

Die inhaltstofflichen Parameter für Abdeckschichten sind in der Haldenrichtlinie geregelt. Auch der Schichtenaufbau selbst ist Gegenstand z. B. der Kali-Haldenrichtlinie bzw. der TA Siedlungsabfall. Demgegenüber sind die geotechnischen und pflanzenphysiologischen Anforderungen in der Haldenrichtlinie nur ansatzweise genannt. So soll das Material der konturgebenden und Kulturschicht

- einem lehmigen Sand/sandigen Lehm entsprechen und über ein ausreichendes Nährstoffdargebot verfügen,
- eine Wasserspeicherfähigkeit von 300 l/m<sup>2</sup> aufweisen und
- durchwurzeltbar sein.

Auch die Standsicherheit ist zu gewährleisten. Methoden und Verfahren hierzu sind in der Haldenrichtlinie nicht angegeben.

---

1 Richtlinie für die Abdeckung und Begrünung von Kalihalden im Freistaat Thüringen – Kali-Haldenrichtlinie – vom 18. April 200

Die Vielschichtigkeit gerade der geotechnischen und pflanzenphysiologischen Eigenschaften der Abdeckschichten wird bei Kali-Rückstandshalden noch komplexer durch verschiedene, vorlandabhängige Überdeckungsvarianten. Dabei besteht bei der Dünnschichtüberdeckung eine direkte Verbindung zu den Böschungen an Verkehrswegen.

Für den Aufbau der konturgebenden Schicht kommen grundsätzlich u. a. folgende Abfälle in Betracht:

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

In der Kulturschicht bei Kali-Rückstandshalden finden neben diesen Komponenten Kulturbodensubstrate Verwendung, für deren Herstellung verschiedenste Schlämme, mineralische Stoffe, Stoffe mit puzzolanischen Eigenschaften und ggf. biogene Materialien eingesetzt werden.

Die Problematik besteht darin, dass die Materialien je nach Aufkommen und Abfallart sowohl Kleinstchargen als auch großtonnagige Mengen umfassen können. Für die Herstellung von Abdeckschichten aus diesen Stoffen bedingt dies die Herstellung von Einmischungen und/oder die Definition der Einbaubedingungen. Da Abdeckschichten oftmals als Schüttungen aufgebaut werden, ist vor allem bei einem Einbau von Kleinstchargen die Problematik der Vermischung oder der Ausbildung von Schichtgrenzen zusätzlich zu berücksichtigen. Mit den geotechnischen und pflanzenphysiologischen Eigenschaften der Abdeckschichten muss eine Langzeitsicherheit von Böschungen und eine langfristige Sicherung und Förderung des Bewuchses gewährleistet werden. Wesentliche Eigenschaftsparameter hierfür sind:

- Feuchte
- Wasseraufnahmefähigkeit
- Porosität
- $k_f$ -Wert
- Scherfestigkeit
- Roh-, Trockendichte und Verdichtungsverhalten
- Begrünbarkeit
- nutzbare Feldkapazität
- Langzeitlagerverhalten.

Hierfür ist je nach Art des Parameters die Anwendung mehrerer Untersuchungsmethoden notwendig. Die Parameter im Einzelfall zu bestimmen, ist daher sehr aufwendig und würde die Wirtschaftlichkeit bei der

Herstellung der Abdeckschichten wesentlich beeinträchtigen und u. U. die wirtschaftliche Machbarkeit gänzlich unmöglich machen. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass die o. g. eigenschaftsbeschreibenden Parameter den Bewertungskriterien für Mutterböden in der Landwirtschaft bzw. der Ingenieurgeotechnik entsprechen.

In Abfällen oder Abfall- sowie Substratmischungen sind aufgrund der von Böden abweichenden chemischen und physikalischen Struktur andere Gesetzmäßigkeiten für den Stoff- und Energieaustausch sowie biogene Prozesse vorhanden, die einer Bewertung bedürfen.

An dieser Stelle setzt das Vorhaben forschungs- und entwicklungsseitig sowohl wissenschaftlich als auch ingenieurtechnisch an. Für in Abdeckschichten zu verwertende Abfälle und/oder Abfallmischungen sollen Bewertungsverfahren entwickelt werden, die es gestatten, die relevanten Eigenschaften einfach und sicher zu vertretbaren Kosten bestimmen zu können. Grundlage hierfür ist eine Validierung der vorhandenen Verfahren und deren experimentelle/kleintechnische Untersuchung an ausgewählten Abfallarten und schon bestehenden Abdeckschichten. Daraus abgeleitet sollen geeignete aussagekräftige Parameter werden, die es ermöglichen, die geotechnischen und pflanzenphysiologischen Eigenschaften von Abdeckschichtmaterialien bzw. der Schichten selbst vorherzusagen.

Die Bewertung erfolgt über eine Klassifizierung und Systematisierung auf der Grundlage mit geringem Aufwand zu bestimmender Klassifizierungsparameter.

In Analogie zum Vorgehen in der Geotechnik und Baugrunderkundung sind als Klassifizierungsparameter die Korngrößenverteilung, die Konsistenz sowie der Mineralbestand vorgesehen. Für die Klassifizierung soll das mathematische Werkzeug der Clusteranalyse eingesetzt werden. Dabei werden experimentell bestimmte geotechnische und pflanzenphysiologische Eigenschaften für Abfallgruppen hinsichtlich ihrer Ähnlichkeit bzw. Unterschiedlichkeit ausgewertet.

Auf diese Art und Weise werden den Herstellern von Abdeckschichten und gleichzeitig den zuständigen Fachbehörden Instrumente zur Verfügung gestellt, die zur derzeit weitgehend ungelösten Situation der notwendigen Ermittlung geotechnischer und pflanzenphysiologischer Parameter einen entscheidenden Beitrag liefern können. Neben der Optimierung von Rekultivierungsschichten wird die Standsicherheit stärker berücksichtigt sowie der Einsatz von neuen Materialien möglich. Kostengünstige Bewertungsverfahren für die relevanten geotechnischen und pflanzenphysiologischen Parameter von Abdeckschichten vorzugsweise aus Abfällen oder Produkten aus der Abfallverwertung stehen nach wie vor nicht zur Verfügung, werden aber benötigt.

Mit der hier vorgesehenen Verfahrensentwicklung sollen die wissenschaftlichen und ingenieurtechnischen Grundlagen für eine Quanti- und Qualifizierung der Eigenschaften von Abdeckschichten vermarktungsfähig und wirtschaftlich anwendbar geschaffen werden.

---

## 2 Ergebnisse im Berichtszeitraum

### 2.1 Arbeitspaket 1: Grundlagenuntersuchungen

Der Stand der Bodenersatzstoff- und Kulturbodensubstratherstellung für Abdeckschichten und deren Entwicklungstendenzen wurde recherchiert und diente mit der durchgeführten Recherche zu Abfallarten und –strömen [2] zur Auswahl der zu untersuchenden Standorte und Materialien und zur Bestimmung möglicher Mischungsverhältnisse für Einmischungen. Die Ergebnisse der Recherchen sind in den Kapiteln 3.1.1 und 3.2.1 des Abschlußberichtes [3] zusammengefasst.

Die Mischungsverhältnisse wurden in Anlehnung der auf den Halden gängigen Praxis und unter Verwendung der zur Verfügung stehenden Einzelstoffe festgelegt. Dabei konnten nur ausgewählte Stoffkombinationen Berücksichtigung finden. Die Kombination der Mischungen enthält Kapitel 3.2.2 des Abschlußberichtes [3].

Für die Untersuchung bereits vorhandener Abdeckschichten wies die Rückstandshalde in Bleicherode besonders günstige Voraussetzungen auf. Diese Beruhen einerseits auf dem Vorhandensein von Abdeckschichten unterschiedlichen Alters und Exposition. Andererseits erfolgte eine langjährige, intensive Betreuung durch die K-UTEC. Die Auswahl der Abdeckschichten orientierte sich an der Diplomarbeit von RUDOLPH zum Thema „Untersuchung und Bewertung des Zusammenhangs zwischen Geländeklima und Bodenwasserhaushaltseigenschaften auf der Kalialthalde Bleicherode (Thüringen)“ [4]. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind teilweise in das Forschungsthema eingeflossen. Die Auswahl der zu untersuchenden Abdeckschichten erfolgte in Kapitel 3.3.2 des Abschlußberichtes [3].

Als geeignete Bewertungsverfahren zur Ableitung der Klassifizierung und Systematisierung konnten in Ergebnis der Literaturlauswertung die bereits im Antrag bezeichneten Parameter größtenteils bestätigt werden. Es wurden folgende Laborparameter für die folgenden Arbeitspakete fixiert:

- a) Geotechnische und bodenphysikalische Parameter:
- Feuchte- und Wassergehalt
  - Konsistenz/Organoleptik
  - Korngrößenverteilung und Ungleichförmigkeitszahl

- 
- 2 Informationen wurden vom Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt zur Verfügung gestellt
- 3 Koch, F.; Schürer, J.; Krieger, U.: Entwicklung von Bewertungsverfahren für geotechnische und pflanzenphysiologische Eigenschaften von Abdeckschichten. -Sondershausen: K-UTEC, 05.11.03 (unveröffentl.)
- 4 RUDOLPH, F. (2002): Untersuchung und Bewertung des Zusammenhanges zwischen Geländeklima und Bodenwasserhaushaltseigenschaften auf der Kalialthalde Bleicherode (Thüringen). –Halle: Martin-Luther-Universität, Fachbereich Geowissenschaften  
Diplomarbeit (unveröffentl.)

- Dichte und Wichte
- Porenvolumina (Gesamt-, Grob-, Mittel- und Feinporen)
- Wasserspeichervermögen (Feldkapazität und Welkepunkt über Wasserspannung)
- Durchlässigkeitsbeiwert
- Scherfestigkeit (Reibungswinkel, Kohäsion, Flügelscherfestigkeit)

b) Chemische und biologische Parameter:

- pH-Wert
- Nährstoffverhältnis (N, C/N)
- Toxizität von Metall-/Schwermetallverbindungen
- Keimfähigkeits- und Aufwuchstests

Hinsichtlich der Aufteilung der Parameter ergaben sich Abweichungen zum Antrag. Während der Bearbeitung insbesondere der Auswertung der Ergebnisse erwies sich die oben aufgeführte Einteilung der Parameter als plausibler.

## 2.2 Arbeitspaket 2: Felduntersuchungen

Die Beprobung vorhandener Abdeckschichten erfolgte 03/03. Die Abdeckschichten wurden an einer repräsentativen Stelle beprobt, wobei jeweils drei Stechzylinderproben (je 250 cm<sup>3</sup>) sowie zwei Probengläser für die bodenphysikalische Analyse im Labor in einer Tiefe von 20 cm unter der Geländeoberkante entnommen wurden. Vor Ort erfolgte die organoleptische Ansprache und die Ermittlung der Flügelscherfestigkeit. Die geotechnischen und pflanzenphysiologischen Parameter wurden bei der K-UTEC und der TLL Jena ermittelt. Die Untersuchung der dichteabhängigen Parameter erfolgte an den ungestörten Proben im Stechzylinder. Die Ergebnisse wurden mit den Resultaten der Diplomarbeit von RUDOLPH [4] verglichen. Die Bewertung der Abdeckschichten ist in Kapitel 4.2.3 des Abschlußberichtes [3] nachzulesen.

Die wichtigsten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Generell sind die untersuchten Materialien durch einen hohen Schluffanteil und einen hohen Wassergehalt gekennzeichnet. Beides lässt ein gutes Wasserspeichervermögen erwarten, was auch die diesbezüglichen Werte bestätigen. Das Gesamtporenvolumen und die Porengrößenverteilung liegen mit Ausnahme der 2. Berme deutlich über den für die Bodenarten festgelegten Literaturwerten. Die Abdeckschichten sind somit durch einen hohen Grob-, Mittel und Feinporenanteil gekennzeichnet und weisen folglich günstige Wasser- und Luftverhältnisse auf. Die nutzbaren Feldkapazitäten sind für alle Abdeckschichten mit über 20 Vol.-% ebenfalls als günstig zu bewerten und überschreiten die nach Kali-Haldenrichtlinie vorgegebenen 13 Vol.-% für eine Mächtigkeit von 2,3 m deutlich.

Die guten Durchlässigkeiten gegenüber Wasser sollten aufgrund der guten Wasserspeicherkapazität und der ohnehin geringen Jahresniederschläge nicht überbewertet werden.

Eine nochmalige, umfassende Untersuchung der Scherfestigkeitsparameter anzuraten, da die Ergebnisse in allen Fällen nur als unsicher zu bewerten sind.

Trotz unterschiedlichen Alters, Zusammensetzung und Exposition konnten für alle untersuchten Abdeckschichten gute bodenphysikalische Eigenschaften nachgewiesen werden. Die Ausnahme bilden die beiden Gereka-Substrate, die aufgrund ihrer geringen Dichte und ihres geringen Scherwiderstandes eine geringere Scherfestigkeit erwarten lassen. Beides ist sowohl durch den hohen Anteil an organischer Substanz als auch durch die Aufbringung durch Schüttung verursacht. Für die Endabdeckungen konnten gute bodenphysikalische Eigenschaften nachgewiesen werden. Sie haben trotz Verdichtung günstige Wasser- und Luftverhältnisse und lassen eine gute Standsicherheit erwarten.

Ein Vergleich der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit mit denen der Diplomarbeit von RUDOLPH [4] ergab, in den meisten Fällen eine gute Übereinstimmung. Abweichungen die sich für die Abdeckung Gereka-Süd hinsichtlich der Bestimmung der Bodenart und das Gesamtporenvolumen ergaben sind wahrscheinlich Materialinhomogenitäten und/oder unterschiedlichen Bestimmungsmethoden anzulasten. Ein Vergleich für die anderen Abdeckungen war aufgrund des unterschiedlichen Analysespektrums nicht möglich.

Die Untersuchung der Wasserspannungen bei RUDOLPH [4] ergab, dass alle Abdeckschichten im Jahresverlauf pF-Werte aufweisen, die sich im Bereich der nutzbaren Feldkapazität befinden. Geringere pF-Werte treten nur vereinzelt und jahreszeitlich bedingt auf. Damit stimmen die Werte gut mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit überein und die Abdeckungen entsprechen zudem den Vorgaben der Kali-Haldenrichtlinie [5].

### **2.3           Arbeitspaket 3: Geotechnische Untersuchungen**

Wie bereits in Kapitel 2.1 – Arbeitspaket 1: Grundlagenuntersuchungen – erwähnt, ist die im Antrag aufgestellte Parameterzuordnung geändert worden. Alle geotechnischen und bodenphysikalischen Parameter wurden im Abschlußbericht [3] aus Gründen der Plausibilität in einem übergeordnetem Kapitel zusammengefasst. Es kommt daher zu Überschneidungen mit Arbeitspaket 4.

Da es sich bei den Stoffen dieser Untersuchung i.d.R. nicht um gewachsenen Boden handelt, sondern um industrielle Abfälle, ist in den Untersuchungen insbesondere der Frage nachzugehen, inwieweit sich die Erkenntnisse bzw. die Klassifikationen aus der Bodenkunde auf diese Materialien übertragen lassen.

Mittels organoleptischer Ansprache erfolgte die Erstbeschreibung der ausgewählten Materialien und Mischungen. Die Untersuchungen zu den geotechnischen bzw. bodenphysikalischen Eigenschaften wurden für alle Einzelstoffe und Mischungen durchgeführt. Die geotechnische Untersuchung erfolgte einmalig, wodurch chargenspezifische Unterschiede keine Berücksichtigung finden konnten. Schwankungen in der

---

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

Zusammensetzung und folglich auch in den Eigenschaften sind jedoch beispielsweise in Abhängigkeit von Jahreszeit (Straßenkehricht) und Produktionsprozessen nicht auszuschließen.

Die Ermittlung der Dichte erfolgte, da nur gestörte Proben gewonnen werden können, als Trocken- und Feuchtdichte über den Proctorversuch. In der Proktorkurve wird die maximale Trockendichte in Abhängigkeit der Materialfeuchten dargestellt. Die daraus ableitbaren Feuchtdichten liefern die Grundlage für die Ermittlung aller dichteabhängigen Parameter. Auf diesem Weg können die Stoffe hinsichtlich ihrer dichteabhängigen Merkmale am sinnvollsten verglichen werden.

Die Anschaffung eines Rahmenschergerätes erfolgte entsprechend unserem Antrag auf Änderung des Finanzierungsplanes für das FuE-Projekt vom 21.12.2001 nicht. Die Scherfestigkeitsversuche wurden im direkten Scherversuch mit einem Rahmenschergerät an der TLL Jena durchgeführt. Die Werte der Scherfestigkeit weisen sehr starke Streuungen auf und sollten in einigen Fällen nochmals eingehend untersucht werden.

Die Ergebnisse sind in Kapitel 4.2 des Abschlußberichtes [3] aufgeführt, beschrieben und bewertet und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die bodenphysikalische Untersuchung verschiedener Abfallstoffe ergab, dass deutliche Unterschiede zwischen mineralischen und organischen Materialien bzw. Materialien mit Anteilen von Organika auftreten.

Die Eigenschaften der mineralischen Stoffe lassen sich anhand ihrer Bodenart sehr gut ableiten, wobei hinsichtlich ihrer Eigenschaften die Erkenntnisse aus der Bodenkunde herangezogen werden können. Die Ausnahmen bilden AS 1 und KO 2. Diese beiden Stoffe weisen ein höheres Wasserspeichervermögen auf als allein anhand der Bodenart zu erwarten wäre.

Die organischen Abfallstoffe sind mit organischen Böden zu vergleichen, d.h. sie ähneln in ihren Eigenschaften einem Anmoor bzw. einem Hochmoor. Sie sind durch geringe Dichten und ein hohes bis sehr hohes Wasseraufnahmevermögen bei guter nutzbarer Feldkapazität gekennzeichnet (Arbeitspaket 4). In gemischten Abfallstoffen wie Straßenkehricht SK 1 und Asche AS 2 wirken sich die organischen Anteile positiv auf die Eigenschaften aus. Dieser Effekt sollte in jedem Fall bei der Herstellung von Mischungen Berücksichtigung finden.

Die nach Kali-Haldenrichtlinie [5] vorgeschriebene nutzbare Feldkapazität von 13 Vol.-% für die Mindestmächtigkeit der Abdeckung von 2,3 m wird nur bei einigen mineralischen Materialien sowie dem Papierschlamm PS 6 und dem Wasserschlamm SM 3 z.T. deutlich unterschritten (Arbeitspaket 4).

Nach der Auswertung aller Parameter kann geschlussfolgert werden, dass für die Unterscheidung der Materialien in „mineralisch“ und „organisch“ sowie die weitere Differenzierung der mineralischen Stoffe in die Bodenart die organoleptische Beschreibung eine zuverlässige Methode darstellt. Allen anderen Parameter sind für die schnelle Beurteilung nicht praktikabel.

Die bodenphysikalischen Eigenschaften der Einzelstoffe werden bei der Vermischung nivelliert. Alle Mischungen weisen günstige Wasser- und Luftverhältnisse auf (Arbeitspaket 4) und bieten damit gute Voraussetzungen für eine künftige Begrünung. Die Zugabe von organischen Stoffen bewirkt einen Rückgang

der Dichte und eine Erhöhung der Feldkapazität und insbesondere der nutzbaren Feldkapazität. In allen Fällen wird die nach der Haldenrichtlinie vorgegebene nutzbare Feldkapazität von 13 Vol.-% erreicht (Arbeitspaket 4). Die Eigenschaft der Papierschlämme, sich nur langsam mit Wasser voll zu saugen, kommt bei den Mischungen nicht mehr zum Tragen. Die bei der Vermischung entstandene Materialstruktur vermindert die Durchlässigkeit gegenüber Wasser und so kann der Papierschlamm seine Speicherkapazität entfalten. Die Mischungen können nach DIN 18 130 als „schwach durchlässig“ eingestuft werden.

Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Scherfestigkeitsparameter Kohäsion und Reibungswinkel sind nur als unsicher zu bewerten. Es ist daher anzuraten hierzu noch einmal umfassende Untersuchungen unter Verwendung eines größeren Schergerätes durchzuführen.

Die bodenphysikalischen Untersuchungen erfolgten bei definierten Einbaudichten von 90 % und 95 % der Proctordichte. Darüber hinaus wäre die systematische Untersuchung der Materialeigenschaften für Dichtereihen sinnvoll.

## **2.4 Arbeitspaket 4: Pflanzenphysiologische Untersuchungen**

Wie auch in Arbeitspaket 3 treten in Arbeitspaket 4 Änderungen in der Parameterzusammenstellung auf. Die im Antrag genannten Parameter Nährstoffverhältnisse, Toxizität aus ausgewählten Einzelstoffen und Mischungen sowie das Testverfahren werden in dem übergeordneten Kapitel „Chemische und biologische Parameter“ abgehandelt. Zusätzlich wurde der pH-Wert ermittelt. Auf die restlichen Parameter wurde bereits in Kapitel 2.3 zum Arbeitspaket 3 eingegangen.

Die Bestimmung des Feuchte-/Wassergehaltes erfolgte in Verbindung mit den Proctorversuchen, die aber nicht mit dem natürlichen Wassergehalt übereinstimmen müssen (Arbeitspaket 3). Die Ergebnisse enthält Kapitel 4.2.2.3.1 [3].

Der Wassergehalt an sich spielt eine untergeordnete Rolle, bedeutsam wird er vor allem im Zusammenhang mit den dichteabhängigen Parametern. Die Bestimmung dieser Parameter erfolgt unter Verwendung des im Proctorversuch ermittelten optimalen Wassergehaltes. Dies ist einerseits sinnvoll, da abweichende Feuchten stets geringere Dichten nach sich ziehen, andererseits können die Anlieferungsfeuchten nicht als repräsentativ angesehen werden.

Die Bestimmung des Porenvolumens erfolgte rechnerisch und experimentell durch die K-UTEC bzw. die TLL Jena (Arbeitspaket 3). Die Ermittlung des Wasserspeichervermögens wurde ebenfalls an der TLL Jena durchgeführt (Arbeitspaket 3).

Für die Beurteilung der chemischen Qualität der Abfallstoffe und Mischungen und deren potentielle schädigende Wirkung auf die Lebewelt wurden die Parameter pH-Wert, TOC,  $N_{ges}$  und die Schwermetalle bestimmt. Zur Ermittlung der Toxizität erfolgte eine Bestimmung der Schwermetallgehalte für alle zu untersuchenden Materialien. Zusätzlich wurde anhand von festgelegten Faktoren der Transfer in die Pflanzen berechnet.

Die Ergebnisse sind in Kapitel 4.3.1 des Abschlußberichtes [3] aufgeführt, beschrieben und bewertet und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die gemessenen pH-Werte liegen mit Ausnahme der alkalischen Gießereisande GS 3 und GS 2 im moderaten Bereich von 6 bis 8 und lassen keine schädigende Wirkung erwarten. Um eine schädigende Wirkung auf Pflanzen sowie durch Schwermetallaustrag zu vermeiden, ist eine regelmäßige Kontrolle bezüglich der pH-Wert-Änderung unter Freilandbedingungen anzuraten.

Die Grenzwerte für  $N_{\text{ges}}$  gemäß Kali-Haldenrichtlinie [5] werden insbesondere bei organischen Materialien wie Klärschlamm, Papierschlamm und Kompost z.T. deutlich überschritten. Die Mischungsverhältnisse sind so zu wählen, dass der Grenzwert sicher eingehalten wird.

Die aus dem C/N-Verhältnis abgeleitete Zersetzbarkeit der organischen Substanz kann innerhalb einer Stoffgruppe erhebliche Schwankungen aufweisen. Daraus ergibt sich für die Papierschlämme PS 2 und PS 3, den Klärschlamm SM 1, den Kompost KO 1 sowie für die organischen Bestandteile der Gießereisande GS 2 und GS 3, den Wasserschlamm SM 3, das Rückstandsmaterials, den Kompost KO 2 und den Straßenkehricht SK 1 eine gute Zersetzbarkeit der organischen Matrix. Das C/N-Verhältnis kann sich unter Freilandbedingungen neu einstellen.

Die nach der Kali-Haldenrichtlinie [5] festgelegten Schwermetall-Grenzwerte werden in den meisten Fällen nicht überschritten. In einigen Materialien wurden jedoch überhöhte Konzentrationen an Cadmium (GS 1, GS 2, SM 3, SK 1, KO 1), Chrom (GS 1), Zink (AS 1, KO 1) und Thallium (GS 2) gemessen. Die Schwermetallgehalte der Mischungen befinden sich alle unter den vorgegebenen Grenzwerten. Auch in diesem Fall sind die Mischungsverhältnisse so zu wählen, dass die Grenzwerte in jedem Fall sicher eingehalten werden.

Bei Berechnung des Schwermetalltransfers in die Pflanze über tabellierte Transferfaktoren werden die kritischen Werte für Cadmium, Chrom, Kupfer und Zink in der überwiegenden Zahl der Abfallstoffe zum Teil deutlich überschritten. Gleiches gilt für die Schwermetalle Cadmium und Zink in sämtlichen Mischungen. Da im Falle der Haldenrekultivierung der Ertrag nicht entscheidend ist, kann im Gegensatz zur landwirtschaftlichen Nutzung eine in gewissen Grenzen beeinträchtigte Pflanzenentwicklung jedoch toleriert werden.

Sinnvolle Maßnahmen sind die Begrünung mit schwermetalltoleranten Pflanzen, die pH-Wert-Erhöhung in der Abdeckschicht zur Schwermetallimmobilisierung bzw. Überführung in nichtpflanzenverfügbare Verbindungen sowie die Zufuhr von oberflächenaktiven Materialien wie Ton und Humus.

Als Testverfahren für die Begrünungsfähigkeit fand der Kressetest Anwendung. Die schnellkeimenden Samen der Gartenkresse ermöglichen eine schnelle Beurteilung der Testmaterialien hinsichtlich ihrer Pflanzenverträglichkeit. Dem eigentlichen Kressetest folgten die Ermittlung des Erntegewichts, der Trockensubstanz und des Glührückstandes. Über diese Angaben lassen sich Aussagen zur Wasser- und Nährstoffversorgung der Pflanzen ableiten.

Als wichtige Ergebnisse sind zu nennen:

- keine Keimung auf Kompost Rossleben, Miete Menteroda und Papierschlamm Mannheim;
- alle Pflanzen auf den übrigen Proben sind im Vergleich mit der Vergleichsprobe (Einheitserde) von niedrigerer Wuchshöhe und kleinblättriger.

Die umfassende Beschreibung der Ergebnisse des Kressetests erfolgte in Kapitel 4.3.2 des Abschlußberichtes [3].

## **2.5 Arbeitspaket 5: Klassifizierung und Systematisierung der Materialgruppen**

Die Klassifizierung erfolgte mit dem mathematischen Werkzeug der Clusteranalyse. Für die Berechnung wurde das Statistikprogramm WinSTAT für Windows ausgewählt. Im Rahmen der Clusteranalyse wurden die folgenden Arbeitsschritte in der entsprechenden Reihenfolge durchgeführt:

- Clusteranalyse A für die bodenphysikalischen Eigenschaften der Abfallstoffe
- Clusteranalyse B für die bodenphysikalischen Eigenschaften der Abfallstoffe und Mischungen
- Clusteranalyse C für den Kressetest der Abfallstoffe
- Clusteranalyse D für den Kressetest der Mischungen in der Gesamtheit der Abfallstoffe
- Clusteranalyse E für die bodenphysikalischen Eigenschaften der Abfallstoffe, Mischungen und Abdeckschichten

Die Ergebnisse der Clusteranalysen sind sinnvoll und stimmen sowohl gut mit den Ergebnissen der bodenphysikalischen als auch mit den Literaturwerten aus der Bodenkunde überein. Als wichtigste Ergebnisse sind zu nennen:

- Die mineralischen und die organischen Materialien können hinsichtlich ihrer bodenphysikalischen Eigenschaften deutlich unterschieden werden. Die in der Bodenkunde beschriebenen Merkmale für mineralische und organische Böden sind für die Abfallstoffe weitgehend zutreffend. Für die mineralischen Stoffe erwies sich die weitere Differenzierung nach der Bodenart mit der Methode der Organoleptik insgesamt als zuverlässig. Die Abschätzung der Bodenart hinsichtlich ihrer Hauptbestandteile Schluff, Sand und Ton ermöglicht Aussagen zu den Wasser- und Luftverhältnissen der Abfallstoffe. Die Ergebnisse der entsprechenden Parameter zeigten eine gute Übereinstimmung mit der jeweiligen Bodenart. Größere Abweichungen ergaben sich lediglich für die Materialien KO 2 und AS 1, in beiden Fällen ist die Wasserkapazität deutlich höher als es die Bodenart erwarten lässt. Die organischen Materialien sind generell durch eine geringe Dichte, eine hohe Wasserspeicherfähigkeit und eine gute

nutzbare Feldkapazität gekennzeichnet. Bereits Anteile von organischen Materialien erhöhen die Wasserspeicherkapazität deutlich.

Die organoleptische Ansprache der Abfallstoffe gibt damit bereits entscheidende Hinweise auf deren Qualität.

- Trotz unterschiedlicher Mischungsvarianten befinden sich alle Mischungen in einem Cluster. Bei Mischungsverhältnissen von etwa gleichen Anteilen an mineralischer und organischer Substanz tendieren die Mischungen hinsichtlich der relevanten bodenphysikalischen Feldkapazität und nutzbare Feldkapazität zu dem Cluster mit den organischen Stoffen. Daraus ist zu schlussfolgern, dass die verwendeten organischen Materialien (PS 4 und KO 1) einen großen Einfluss auf die Qualität der Mischungen ausüben. Die Auswahl der mineralischen Grundstoffe hat dagegen im Rahmen der verwendeten Substrate bodenphysikalisch eine nur geringe Auswirkung.

Generell wirkt sich die Zumischung von organischem Material positiv auf den Wasser- und Lufthaushalt der Mischungen aus, wobei sich ein Mischungsverhältnis von etwa gleichen Anteilen von mineralischer und organischer Substanz als günstig erwies. Die nivellierenden Effekte einer Vermischung sollten gezielt ausgenutzt werden. Da die ermittelten Scherfestigkeiten nur als unzuverlässig zu bewerten waren, kann die Frage der Standsicherheit in dieser Arbeit nicht sicher geklärt werden.

- Ausgehend von der Bodenart lässt sich nur bedingt auf die Begrünbarkeit der Abfallstoffe schließen. Die Bodenart gibt lediglich Anhaltspunkte zur Wasserversorgung und zur Durchwurzelbarkeit. Die Pflanzenverträglichkeit ist darüber hinaus auch vom Nähr- und Schadstoffgehalt der Substrate abhängig. Generell sind die Abfallstoffe schlechter mit Nährstoffen versorgt.

Allgemein gilt auch für den Kressetest, dass die Eigenschaften durch Vermischung nivelliert werden. Die bodenphysikalischen und die chemischen Eigenschaften können und sollten auch unter dem Aspekt der Begrünung gezielt beeinflusst werden. Beispielsweise lassen sich Stoffe mit offensichtlich negativen Eigenschaften einerseits durch Vermischung qualitativ aufwerten, andererseits werden folglich durch die Zugabe solcher Stoffe die Eigenschaften der Vermischung verschlechtert. Die Herstellung einer Mischung ist grundsätzlich vom Ziel und den zur Verfügung stehenden Ausgangsstoffen abhängig.

- Die Validierung der Clusteranalyse erfolgte unter Verwendung bereits vorhandener Abdeckschichten. Für eine endgültige Validierung war die Datenlage jedoch nicht ausreichend. Hier wären weiterführende Untersuchungen zu empfehlen, die auf definierten Mischungsverhältnissen und einer regelmäßigen, langfristigen Kontrolle (Monitoring) basieren.

Die Ergebnisse und die Bewertung der durchgeführten Clusteranalysen enthält Kapitel 5 des Abschlußberichtes [3].

## **2.6 Arbeitspaket 6: Entwicklung eines Monitoringsystems für Abdeckschichten**

Ein Monitoring sollte überprüfen, ob die Wirksamkeit der Abdeckschichten auch auf lange Zeit erreicht wird. Da die Abdeckschichten unter Freilandbedingungen einer Vielzahl von Einflüssen unterliegen, sollte deren Beobachtung mit dem Einbau beginnen. Nur so können die Entwicklung kontinuierlich verfolgt, Qualitätsmängel ausgebessert und neue Erkenntnisse für die Herstellung zukünftiger Abdeckschichten gewonnen werden. Das Monitoring sollte sowohl die qualitative als auch die quantitative Beschreibung umfassen. Das Monitoringprogramm ist für die einzelnen Haldenstandorte zu konkretisieren.

Beispielsweise ist hinsichtlich der bodenphysikalischen Parameter ist zu überprüfen, wie sich die Dichten und damit die Wasser- und Luftverhältnisse aber auch sich Stabilität verändern. Interessant sind hierbei insbesondere die Fragen, ob wesentliche Eigenschaftsänderungen durch die Zersetzung der Papierschlämme hervorgerufen werden und in welchem Maße sich die Stabilität und die Wasserverhältnisse durch die Durchwurzelung verändern.

Vorschläge für ein Konzept für ein Monitoringprogramm enthält Kapitel 7 des Abschlußberichtes [3].

## **2.7 Arbeitspaket 7: Feldversuche**

Grundlage der Feldversuche in Arbeitspaket 7 bilden die Arbeitspakete 5 und 6. Die für den Zeitraum 09/02 – 04/03 geplanten Arbeiten zur Erprobung der entwickelten Klassifikation und Systematisierung in Versuchsabdeckschichten bzw. bei der Herstellung von Abdeckschichten mussten auf den Zeitraum 05/03 – 06/03 verschoben werden.

Die Ergebnisse der Feldversuche sind im Abschlußbericht [3] in Abschnitt 4.2.3 dokumentiert.

## **2.8 Arbeitspaket 8: Zusammenfassung und Dokumentation zu den Bewertungsverfahren**

Die Zusammenstellung der Unterlagen für ingenieurtechnische Dienstleistungen in Form des Abschlußberichtes zum Forschungsthema [3] erfolgte fristgemäß bis 11/03.

# **3 Bewertung der Ergebnisse**

## **3.1 Bewertung der Ergebnisse gemessen an den Zielsetzungen des Antrages**

Mit den durchgeführten Labor- und Felduntersuchungen wurden die im Antrag formulierten Zielsetzungen des FuE-Vorhabens erfüllt. Die bodenphysikalische Untersuchung ergab, dass deutliche Unterschiede zwischen mineralischen und organischen Materialien bzw. Materialien mit Anteilen von Organika bestehen. Die Eigenschaften beider Gruppen sind generell mit den Erkenntnissen aus der Bodenkunde zu vergleichen. Nach der Auswertung aller bodenphysikalischen Parameter konnte geschlussfolgert werden, dass für die

Unterscheidung der Materialien in „mineralisch“ und „organisch“ sowie die weitere Differenzierung der mineralischen Stoffe in die Bodenart die organoleptische Beschreibung eine schnelle und zuverlässige Methode darstellt. Alle anderen Parameter sind für die schnelle Beurteilung nicht praktikabel. Die Differenzierung zwischen organischen und mineralischen Materialien konnte über die Clusteranalyse eindeutig bestätigt werden. Bei der Vermischung werden die Eigenschaften generell nivelliert, wobei die Eigenschaften bei gleichen Anteilen mineralischer und organischer Substanz tendenziell den organischen Materialien ähnlicher sind. Die Zugabe organischer Substanz wirkt sich in jedem Fall positiv auf die Mischungseigenschaften aus.

### **3.2 Einschätzung der Ergebnisse für das Unternehmen in technischer Sicht**

Die Nutzung von externen freien Rahmenschergerätskapazitäten erschien 2001 (Antrag auf Änderung des Finanzierungsplanes für das FuE-Projekt vom 21.12.2001) als die kostengünstigere Variante gegenüber der antragsgemäßen Neuinvestition. Dabei stellte sich jedoch heraus, dass dies technisch nachteilig ist, da die bei den Kooperationspartnern genutzten Geräte unterschiedliche (nicht direkt vergleichbare) Messergebnisse lieferten. Der daraus resultierende Mehraufwand führte zu Verzögerungen im zeitlichen Bearbeitungsverlauf.

### **3.3 Einschätzung der Ergebnisse für das Unternehmen in wirtschaftlicher Sicht**

Durch die verbesserte Kenntnis der geotechnischen und pflanzenphysiologischen Kenngrößen der auf den Kalihalden zum Einsatz gelangenden Abfallstoffe ist es der K-UTEC zukünftig möglich effizientere Rezepturvorschläge für Bodenersatzstoffe zu erarbeiten und damit die Beratungstätigkeit für die Haldenbetreiber zu optimieren.

### **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. Bisher 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](http://www.kutec.de) und in geeigneten Fachzeitschriften geplant.