

M.-Sc. Mingliang XIE

Vom Fachbereich VI
(Geographie/Geowissenschaften)
der
Universität Trier

zur Verleihung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaften
(Dr.rer.nat.)
genehmigte

DISSERTATION

**Untersuchungen zur Verwertung von Abfällen
in Abdichtungssystemen für Deponien und
Altablagerungen**

Betreuer: Univ.-Prof. Dr. J.-F. Wagner

Berichterstatter: Dr. R. Kilian

Berichterstatter: Prof. G. Rettenberger

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 14.02.2003

Trier, 2003

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

Summary	
Kurzfassung	
Vorwort	(I)
Inhaltsverzeichnis	(II)
Abbildungsverzeichnis	(VI)
Tabellenverzeichnis	(X)
1 Einleitung und Aufgabenstellung	(1)
1.1 Einleitung	(1)
1.2 Kenntnisstand	(2)
1.2.1 Übersicht	(2)
1.2.2 Regeloberflächenabdichtungssysteme	(2)
1.2.3 Alternative Oberflächenabdichtungsmaterialien	(4)
1.2.4 Auswirkung des Deponiekörpers auf die Abdichtungssysteme	(5)
1.3 Zielsetzung der Arbeit	(6)
2 Theoretische Beschreibung des Wassertransportes und Rissbildung in	
Dichtungssystemen von Abfalldeponien	(8)
2.1 Funktion von Dichtungssystemen bei Abfalldeponien	(8)
2.2 Belastungen für die Abdichtungsschichten	(9)
2.3 Definition des Begriffes „Durchlässigkeit“ bzw. "Dichtigkeit"	(11)
2.4 Wasserbewegung in porösen Medien	(12)
2.4.1 Wasser in porösen Medien	(12)
2.4.2 Potentialtheorie	(14)
2.4.2.1 Einleitung	(14)
2.4.2.2 Gesamtpotential und Teilpotentiale	(15)
2.4.2.3 Kombination von Teilpotentialen	(17)
2.4.2.4 Potential-Gleichgewicht	(18)
2.4.2.5 Wassergehalt und Matrixpotential	(19)
2.4.2.6 Hysteresis im Bodenwasserphänomen	(21)
2.4.2.7 Kapillarer Aufstieg	(23)
2.4.3 Flüssigkeitsbewegung im Bodenkörper	(26)
2.4.3.1 DARCY-Gesetz	(27)
2.4.3.2 Hydraulische Durchlässigkeit	(29)
2.4.3.3 Die Fundamentalgleichung der Grundwasserbewegung	(32)

2.4.4	Wasserdampfbewegung.....	(35)
2.5	Transport von Wasserinhaltsstoffen.....	(39)
2.6	Trocknungsprozess und Rissbildung.....	(40)
2.6.1	Mechanismus des Trocknungsprozesses	(40)
2.6.2	Rissbildung.....	(42)
2.7	Thermodynamik des Bodens.....	(46)
2.7.1	Allgemeines.....	(46)
2.7.2	Thermodynamik des Bodenwassers	(46)
2.7.3	Grenzflächenphänomen	(47)
2.7.3.1	Grenzflächen	(47)
2.7.3.2	Grenzflächenspannung.....	(47)
2.7.3.3	Benetzung.....	(50)
2.7.3.4	Die gekrümmte Grenzfläche	(51)
2.7.3.5	Gesättigter Dampfdruck für feine Tropfen.....	(52)
2.7.3.6	Wasserhysterese	(53)
2.7.4	Thermodynamik der Silikate	(54)
3	Technische Anforderungen an Regelabdichtungen und Alternativsysteme	(55)
3.1	Allgemeine Anforderungen	(55)
3.2	Anforderungen an Regeloberflächenabdichtungssysteme	(55)
3.3	Gleichwertigkeit von Alternativsystemen.....	(57)
3.4	Alternative Abdichtungsmaterialien.....	(57)
3.4.1	Grundlegende Anforderungen	(57)
3.4.2	Mineralische Neubildungen.....	(58)
3.4.3	Chemische Reaktionen	(60)
4	Auswahl und grundlegende Eigenschaften der Abfälle zur Verwertung in Abdichtungssystemen	(62)
4.1	Anforderungen.....	(62)
4.2	Produkte und Auswahl	(63)
4.3	Probenbeschreibung	(64)
4.4	Abfälle aus den Eisenhütten- und Stahlindustrie	(67)
4.4.1	Elektroofenschlacke.....	(68)
4.4.2	Gichtstäube	(69)

4.4.3	Schlacken aus der Eisenhüttenindustrie	(70)
4.5	Abfälle aus Müllverbrennungsanlagen.....	(74)
4.6	Mechanisch-biologisch vorbehandelte Siedlungsabfälle (MBA).....	(77)
4.6.1	Einleitung.....	(77)
4.6.2	Mechanisch-biologische Behandlungsmethode	(77)
4.6.3	Probenbeschreibung.....	(80)
4.6.4	Laboruntersuchungen	(80)
4.6.5	Grundlegende Eigenschaften	(81)
4.6.5.1	Zusammensetzung	(81)
4.6.5.2	Glühverlust (GV) und Atmungsaktivität (AT ₄)	(82)
4.7	Natürliche Materialien.....	(84)
4.8	Mischungen	(89)
4.9	Dünnblattboden MOD.....	(90)
5	Messmethodik	(92)
5.1	Hydraulische Durchlässigkeitsversuche.....	(92)
5.1.1	Messprinzip	(92)
5.1.2	Gerätebeschreibung	(92)
5.1.3	Vorbereitung der Proben	(94)
5.1.4	Einbauen der Proben unter Wasser.....	(94)
5.1.5	Bestimmung der gesättigten hydraulischen Durchlässigkeit.....	(95)
5.2	Messmethodik zur Untersuchung der Abfälle.....	(96)
5.2.1	Einleitung.....	(96)
5.2.2	Aushärtungsversuche.....	(97)
5.2.3	Trocknungsversuche.....	(98)
5.2.4	Messmethodik zur Untersuchung der MBA Materialien	(99)
5.2.4.1	Bestimmung der Atmungsaktivität (AT ₄).....	(99)
5.2.4.2	Sortieranalyse.....	(99)
6	Ergebnisse und Interpretation der Laborversuche.....	(100)
6.1	Mischungsversuche mit Abfällen.....	(100)
6.1.1	Einleitung.....	(100)
6.1.2	Ergebnisse und Interpretation	(100)
6.1.2.1	Aushärtung.....	(100)

6.1.2.2	Mineralische Veränderungen.....	(101)
6.1.2.3	Untersuchung der Mikrogefüge	(106)
6.1.2.4	Dichtungswirkung.....	(109)
6.1.2.4.1	Einleitung.....	(109)
6.1.2.4.2	Durchlässigkeitsmessungen	(111)
6.1.2.4.2.1	Durchlässigkeit und Verdichtung.....	(111)
6.1.2.4.2.2	Durchlässigkeitsuntersuchung.....	(114)
6.1.3	Trocknungstest.....	(120)
6.1.3.1	Trocknungstest mit Ton (TSL)	(120)
6.1.3.2	Trocknungstest mit einer Mischung aus Verbrennungsschlamm und Hüttensand	(126)
6.1.3.3	Trocknungstest mit dem Dünnschlamm (MOD).....	(130)
6.2	Versuche mit MBA Materialien	(136)
6.2.1	Proctor- und Durchlässigkeitsversuche	(136)
6.2.1.1	Untersuchungen mit abgesiebten MBA Materialien.....	(136)
6.2.1.2	Zugabe von natürlichen mineralischen Stoffen und Abfällen	(139)
6.2.1.3	Einfluss des Umlagerungsdruckes auf die Durchlässigkeitsbeiwerte.....	(144)
6.2.2	Sickerwasser	(147)
6.2.3	Langfristige Dichtwirkung	(149)
6.2.4	Gefügeuntersuchung.....	(151)
7	Entwicklung eines Wassertransportmodells für MBA Materialien	
7.1	Einleitung	(153)
7.2	Dünnschlamm-Modell	(153)
7.3	Modelltest im Labor	(155)
7.4	Numerische Modellierung des Wassertransportes nach dem „Dünnschlamm-Modell“	(157)
7.4.1	Grundlage der Finite-Differenzen-Methode (FDM).....	(158)
7.4.2	Beschreibung des Programms MODFLOW	(159)
7.4.3	Anwendung des Programms MODFLOW	(159)
7.4.4	Ergebnisse und Interpretation.....	(160)
7.4.4.1	Einfluss eines Folienstückes	(160)
7.4.4.2	Einfluss von zwei Folienstücken	(163)

7.4.4.3	Einfluss von mehr als zwei Folienstücken.....	(164)
7.4.4.4	Einfluss der Anordnung der Folienstücke.....	(166)
7.5	Vergleich der Ergebnisse aus der numerischen Modellierung und den Laboruntersuchungen.....	(168)
7.6	Ausblick.....	(169)
8	Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	(170)
9	Literatur	(173)
ANHANG		(184)

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1-1:	Oberflächenabdichtungssysteme nach TA Abfall (1991) und TA Siedlungsabfall (1993).....	3
Abb. 1-2:	Rissbildung bei einer bindigen mineralischen Oberflächenabdichtung in einem Testfeld in Luxemburg (s. SCHNATMEYER 1998).....	4
Abb. 2-1:	Schematische Darstellung mechanischer Spannungen in Abdichtungs- schichten 1 - Rekultivierungsschicht, 2 - Drainage, 3 - Abdichtungsschicht, 4 - Kunststoffbahn	9
Abb. 2-2:	Einflussfaktoren auf die Dichtigkeit.....	11
Abb. 2-3:	Bodenwasser (nach JORDAN & WEDER 1995)	12
Abb. 2-4:	Schematische Darstellung (schwebendes) Grundwassers (nach HÖLTING 1989, Abb.35, geändert).....	13
Abb. 2-5:	Hydraulisches Potential, Matrixpotential, Gravitationspotential und Wassergehalt in einer Bodensäule im Gleichgewicht(—), bei Versickerung(-- -) und kapillarem Aufstieg(···) (nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1982)	19
Abb. 2-6:	pF-Kurven bei einem Sandboden, einem tonigen Schluffboden (Lößboden) und einem Tonboden (FK=Feldkapazität, PWP= permanenter Welkepunkt) (nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1982).....	20
Abb. 2-7:	Einfluß des Gefüges auf die Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt. Die vier Kurven kennzeichneten gleichen Lößboden mit verschiedenen Porenvolumina, als Folge unterschiedlichen Gefüges. (nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1982)	21
Abb. 2-8	Schematische Darstellung des Hysteresiseffekts im Bodenwasser: Matrixpotential Ψ gegen Wassergehalt (nach IWATA et al. 1988).....	22