

Mitteilung des Instituts
für Grundbau und Bodenmechanik
Technische Universität Braunschweig



Heft Nr. 32

IGB·TUBS

Schnellverfahren für die Güteüberwachung mineralischer Deponiebasisabdichtungen

von
Joachim Knüpfer

Braunschweig 1990

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. W. Rodatz

Vorwort

Im Rahmen der zahlreichen am Institut laufenden Arbeiten auf dem Gebiet der Deponietechnik werden durch den engen Kontakt zu Baustellen und Betreibern von Deponien immer wieder neue, z. T. grundlegende Fragestellungen aufgeworfen, deren umfassende und praxisgerechte Beantwortung ein Anliegen aller Institutsangehörigen ist.

Herr Knüpfer untersuchte in diesem Zusammenhang die Möglichkeiten der Güteüberwachung während des Einbaus einer mineralischen Deponiebasisabdichtung im Rahmen der Qualitätssicherung eines Deponiebauwerks.

Die Fragestellung war, welche Versuche unter der Vorgabe, daß die Ergebnisse schnell vorliegen, für die Überwachung einer ordnungsgemäßen Herstellung der mineralischen Abdichtung notwendig bzw. ausreichend sind. Der Bauleitung und den Überwachern kann mit solchen einbaubegleitenden Schnellverfahren ein Mittel zur Verfügung gestellt werden, so früh wie möglich in den Bauablauf einzugreifen. So können zeitliche und finanzielle Verluste durch sonst erst nach Tagen oder Wochen vorliegende Prüfergebnisse der fertig hergestellten mineralischen Abdichtung vermieden und der Bauablauf und die Qualität des Bauwerks verbessert werden.

Die von Herrn Knüpfer durchgeführten Untersuchungen haben ergeben, daß es praxisgerecht und sinnvoll einsetzbare Verfahren gibt. Zur Zeit kann jedoch auf die bisher verwendeten genormten, aber zeitintensiven Versuche zu Zwecken der Kalibrierung z. B. während eines Probefeldes und zur endgültigen Absicherung der Ergebnisse noch nicht verzichtet werden. Hier liegt für die Zukunft weiterer Handlungs- und Untersuchungsbedarf.

Für die finanzielle Unterstützung der Untersuchungen durch den Niedersächsischen Minister für Wissenschaft und Kunst im Rahmen des Forschungsvorhabens "Verbesserung der Gütekontrolle bei der Herstellung mineralischer Deponiebasisabdichtungen" bedanken wir uns recht herzlich.

Braunschweig, im August 1990

Walter Rodatz

Zusammenfassung

Der Qualität mineralischer Deponiebasisabdichtungen kommt auch in Zukunft besondere Bedeutung zu. Nachdem in den letzten Jahren erhebliche Qualitätsverbesserungen durch Verbesserung der Materialeigenschaften erreicht wurden, ist man hier an Grenzen gestoßen. Qualitätsverbesserungen werden in Zukunft vor allem durch eine verbesserte Qualitätssicherung zu erreichen sein.

Wesentlicher Bestandteil der Qualitätssicherung ist eine effektive Güteüberwachung bei der Herstellung der Basisabdichtung. Zur Zeit ist hier zu beklagen, daß die Güteüberwachung wegen der erforderlichen langen Versuchszeiten nicht baubegleitend arbeiten kann. Vielmehr werden entweder Einschränkungen im Bauablauf hingenommen, die wiederum die Qualität nachteilig beeinflussen können, oder es wird weitergebaut, bevor entsprechende Prüfzeugnisse die Einhaltung der Anforderungen bestätigt haben.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Genauigkeit und Reproduzierbarkeit von Schnellverfahren zur Güteüberwachung mineralischer Basisabdichtungen untersucht. Dabei werden vor allem Verfahren der Wassergehaltsbestimmung mit dem Mikrowellenherd und radiometrischen Sonden und die Dichtebestimmung mit der radiometrischen Sonde berücksichtigt. Die Anwendungsgrenzen der Schnellverfahren werden gezeigt.

Nach Durchführung umfangreicher Feldversuche im Rahmen von Güteüberwachungen auf Baustellen werden Empfehlungen für die Praxis der Güteüberwachung mit Schnellverfahren erarbeitet.

Summary

In the future the quality of mineral base sealing systems will continue to be of special importance. Limits have been reached after great quality advancements have been made through the improvement of the material properties. In the future quality advancement will mainly be reached through improved quality guarantee.

The effective quality control check during the production of a base sealing is an important part of the quality guarantee. Nowadays it can be deplored that the quality control checking can not be done parallel to the production because of the long test periods. On the contrary either limitations in the building expiration are excepted - which can have negative influence on the quality - or the production continues before test certificates confirm that the demands are kept.

In this report the precision and the reproducibility of the quick test method for the quality control check of mineral base sealings are examined. Special attention is paid to the methods of the ascertainment of moisture content with the microwave oven and with the nuclear gauges. The ascertainment of the density with the nuclear gauges is also noticed. The limits of application of these quick test methods are shown.

After the execution of extensive field investigations on sites recommendations for the quality control check through quick tests are worked out.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG _____	1
1.1 Allgemeines _____	1
1.2 Ziel der Arbeit _____	3
1.3 Aufbau der Arbeit _____	4
 2. HERSTELLUNG MINERALISCHER DEPONIEBASIS- ABDICHTUNGEN _____	 5
2.1 Historische Entwicklung _____	5
2.2 Stand der Technik _____	8
 3. EIGENSCHAFTEN MINERALISCHER DEPONIEBASIS- ABDICHTUNGEN _____	 14
3.1 Allgemeines _____	14
3.2 Bodenmechanische Eigenschaften _____	14
3.3 Durchlässigkeitsverhalten _____	18
3.4 Erforderliche Eigenschaften des Abdichtungsmaterials _____	23
 4. QUALITÄTSSICHERUNG MINERALISCHER DEPONIEBASIS- ABDICHTUNGEN _____	 28
4.1 Allgemeines _____	28
4.2 Eignungsprüfung mineralischer Basisabdichtungen _____	29

	Seite
4.2.1	Allgemeines 29
4.2.2	Probefelder 30
4.3	Güteüberwachung mineralischer Basisabdichtungen 31
4.3.1	Allgemeines 31
4.3.2	Aufgaben der Güteüberwachung 32
4.3.3	Umfang der Güteüberwachung 32
4.3.4	Folgerungen für die Güteüberwachung 35
5.	VORLIEGENDE UNTERSUCHUNGEN ÜBER SCHNELLVER- SUCHE FÜR DIE GÜTEÜBERWACHUNG MINERALISCHER DEPONIEBASISABDICHTUNGEN 37
5.1	Allgemeines 37
5.2	Bestimmung des Wasserbindevermögens 37
5.3	Bestimmung des Wassergehaltes 39
5.3.1	Genormte Verfahren 39
5.3.2	Mikrowelle 40
5.3.3	Radiometrisches Verfahren 44
5.4	Bestimmung der Feuchtdichte 44
5.4.1	Genormte Verfahren 44
5.4.2	Radiometrisches Verfahren 45
5.4.2.1	Allgemeines 45
5.4.2.2	Physikalische Grundlagen 46
5.4.2.3	Messung der Feuchtdichte 47
5.4.2.4	Messung des Wassergehaltes 50
5.4.2.5	Konstruktion radiometrischer Sonden 52
5.4.2.6	Genauigkeit und Reproduzierbarkeit 55
5.5	Bestimmung der eingemischten Bentonitmenge 64

	Seite
6. EIGENE UNTERSUCHUNGEN	67
6.1 Allgemeines	67
6.2 Bestimmung des Wasserbindevermögens	72
6.2.1 Allgemeines	72
6.2.2 Genauigkeit und Reproduzierbarkeit	73
6.2.3 Korrelation mit anderen Bodenkennwerten	78
6.2.4 Beurteilung	86
6.3 Bestimmung des Wassergehaltes mit Mikrowellen	87
6.3.1 Allgemeines	87
6.3.2 Genauigkeit und Reproduzierbarkeit	88
6.3.2.1 Vorversuche	88
6.3.2.2 Versuche mit Boden	94
6.3.3 Einfluß auf andere Bodenkennwerte	102
6.3.4 Beurteilung	102
6.4 Bestimmung der Dichte und des Wassergehaltes mit dem radiometrischen Verfahren	103
6.4.1 Allgemeines	103
6.4.2 Verwendete radiometrische Sonde	104
6.4.2.1 Beschreibung der Sonde	104
6.4.2.2 Kalibrierverfahren	106
6.4.3 Versuchsanordnung für das radiometrische Verfahren	114
6.4.4 Bestimmung der Dichte	117
6.4.4.1 Einfluß der Meßtiefe	117
6.4.4.2 Einfluß der Oberfläche	122
6.4.4.3 Vergleich mit anderen Versuchstypen	126
6.4.5 Bestimmung des Wassergehaltes	130
6.4.5.1 Einfluß der Meßtiefe	130
6.4.5.2 Einfluß der Oberfläche	131
6.4.5.3 Vergleich mit anderen Versuchstypen	133
6.4.6 Berechnung der Trockendichte	137

VII

	Seite
6.4.7	Beurteilung 138
6.5	Bestimmung des Anteils eingemischten Bentonits 139
6.5.1	Allgemeines 139
6.5.2	Genauigkeit und Reproduzierbarkeit 140
6.5.2.1	Verwendete Materialien 140
6.5.2.2	Untersuchung von Mischungen 141
6.5.3	Beurteilung 144
6.6	Baustellenversuche 146
6.6.1	Überblick 146
6.6.2	Abdichtung mit ausgeprägt plastischem Ton 147
6.6.3	Abdichtung mit bentonitverbessertem Schluff 153
7.	EMPFEHLUNGEN FÜR DIE GÜTEÜBERWACHUNG MINERALISCHER DEPONIEABDICHTUNGEN 161
7.1	Grundlagen 161
7.2	Versuchsdurchführung 164
8.	SCHLUSSBEMERKUNGEN 168
9.	SCHRIFTTUM 171

VIII

Bezeichnungen

a	[m]	Einbaulagendicke
A	[MNm/m ³]	Verdichtungsenergie
d	[m]	Stärke der Abdichtung
D _{Pr}	[-]	Verdichtungsgrad nach Proctor
f	[-]	Fehler, Abweichung
G _t	[g]	Probemenge (Trockenmasse)
I _C	[-]	Konsistenzzahl
k	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert nach Darcy
m _w	[g]	Wassermasse einer Probe (bez. auf 105°C)
m _d	[g]	Trockenmasse einer Probe (bez. auf 105°C)
n	[-]	Umfang einer Stichprobe
n _a	[-]	Luftporenanteil
N	[1/s]	Aktivität (radioaktiver Zerfall)
N _O	[1/s]	Anfangsaktivität
R	[-]	Korrelationskoeffizient
t	[s][a]	Zeit
T _{1/2}	[a]	Halbwertszeit (radioaktiver Zerfall)
s	[-]	Standardabweichung
v	[%]	Variationskoeffizient
v _{ca}	[-]	Kalkgehalt nach Scheibler
v _{gl}	[-]	Glühverlust 600 °C
w	[-]	Wassergehalt (Ofentrocknung 105 °C)
w _b	[-]	Wasserbindevermögen nach Neff
w _L	[-]	Wassergehalt an der Fließgrenze
w _m	[-]	Wassergehalt (Mikrowelle 600 W)
w _{Pr}	[-]	optimaler Wassergehalt nach Proctor
w _{rad}	[-]	Wassergehalt (radiometrisch)
x	[-]	arithmetisches Mittel
z	[-]	Streubreite

IX

μ	[St.]	Impulse (radiometrisch)
ρ	[t/m ³]	Feuchtdichte (DIN 18.125)
ρ_B	[t/m ³]	Feuchtdichte (Ballonverfahren)
ρ_S	[t/m ³]	Feuchtdichte (Sandersatzverfahren)
ρ_s	[g/cm ³]	Korndichte (DIN 18.124)
ρ_{rad}	[t/m ³]	Feuchtdichte (radiometrisch)
ρ_d	[t/m ³]	Trockendichte (DIN 18.125)
ρ_{dm}	[t/m ³]	Trockendichte (Wassergehalt Mikrowelle)
ρ_{drad}	[t/m ³]	Trockendichte (Wassergehalt radiometrisch)

1. EINLEITUNG

1.1 Allgemeines

Die Herstellung von mineralischen Deponiebasisabdichtungen gewinnt in den letzten 20 Jahren zunehmend an Bedeutung. Wurden noch Ende der 60er Jahre - wenn überhaupt - Abdichtungen für Deponien in einfachster Weise gefordert, werden in jüngster Zeit höchste Anforderungen gestellt, die bis an die Grenze des technisch Machbaren gehen.

Basisabdichtungssysteme haben die Aufgabe, den Durchtritt der in der Deponie enthaltenen Sickerwässer möglichst zuverlässig und auf Dauer zu verhindern. Basisabdichtungssysteme bestehen generell aus mehreren Schichten, die verschiedene Aufgaben zu erfüllen haben. Über einem ausreichend tragfähigen Planum folgen die abdichtenden Schichten. Darüber ist eine Dränschicht angeordnet. Die Schutzschicht schließt das Abdichtungssystem nach oben ab. Alle Schichten werden - falls erforderlich - durch filterstabile Geotextile getrennt. Durch die mehrfache Folge von Abdichtungs- und Dränschichten ist eine Kontrollierbarkeit des Abdichtungssystems zu erreichen. Bild 1 zeigt verschiedene Basisabdichtungssysteme für Deponien, die alle nach dem genannten Prinzip aufgebaut sind.

Für die Herstellung des mineralischen Teils der Basisabdichtung sind heute verschiedene Verfahren üblich. Gebräuchlich sind:

- Herstellung mineralischer Abdichtungen aus natürlichen Tonen, gegebenenfalls nach Homogenisierung und Vorzerkleinerung des Materials
- Herstellung mineralischer Abdichtungen mit aus verschiedenen, im Zwangsmischer oder mit Erdbaugeräten gemischten Böden
- Herstellung mineralischer Abdichtungen aus einem Boden unter Einmischung geringer Mengen hochquellfähiger Bentonite

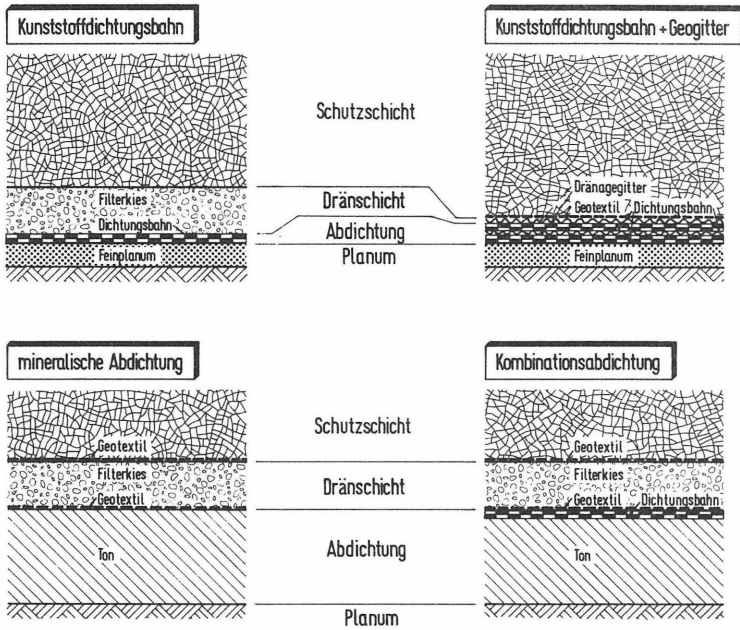


Bild 1: Aufbau verschiedener Basisabdichtungssysteme für Deponien (Hänsel 1981, Jessberger 1987a und Knüpfer, Reuter 1987)

Allen Verfahren ist gemeinsam, daß das Material plastisch bleibt und keine hydraulische Bindung aufweist. Frühere Versuche, bekannte Verfahren mit hydraulischer Bindung wie die Kalkstabilisierung (Brandl 1971) zu verwenden, haben sich nicht durchgesetzt.

Zur Verbesserung der Wirksamkeit mineralischer Basisabdichtungen wurde zunächst die Schichtstärke vergrößert. Dann wurden die Anforderungen an die Eigenschaften des Abdichtungsmaterials, insbesondere an die Wasserundurchlässigkeit, erhöht. Nachdem sich

die Schichtstärke und die Wasserundurchlässigkeit aus wirtschaftlichen und technischen Gründen nicht mehr verbessern ließen, wird die Qualitätskontrolle bei der Herstellung der Abdichtung immer stärker beachtet. Dabei setzt sich die aus anderen Bereichen des Bauwesens bekannte Vorgehensweise der Qualitätssicherung langsam durch (Meyer 1986).

Die Qualität einer Abdichtung wird wesentlich dadurch beeinflusst, ob die in Eignungsprüfungen nachgewiesenen Eigenschaften des Abdichtungsmaterials gleichmäßig und durchgehend vorhanden sind. Die Eignung des Materials für mineralische Deponieabdichtungen ist dabei in der Regel in jedem Einzelfall gesondert nachzuweisen (Jessberger 1987a). Es sind Art und Zusammensetzung des Abdichtungsmaterials zu untersuchen, die Einbaukriterien festzulegen sowie die Eigenschaften des Abdichtungsmaterials im Gebrauchszustand zu ermitteln.

1.2 Ziel der Arbeit

Für die Qualität einer Basisabdichtung ist vor allem ihre Wasserdurchlässigkeit entscheidend. Darüber hinaus werden derzeit im Rahmen von Güteüberwachungen zahlreiche bodenmechanische Kennwerte bestimmt. Eine Vorschrift oder Norm, die Art und Umfang der Güteüberwachung detailliert regelt, existiert noch nicht.

In jüngster Zeit sind einige Empfehlungen und Entwürfe für Richtlinien veröffentlicht worden. Danach sind umfangreiche und zeitintensive Untersuchungen auszuführen. Dieser Zeitbedarf führt dazu, daß die Ergebnisse der Güteüberwachung oft erst nach Abschluß der Bauarbeiten vollständig zur Verfügung stehen. Besonders effektiv ist die Güteüberwachung jedoch dann, wenn ihre Ergebnisse als Instrument der Bauüberwachung und Baulenkung eingesetzt werden.

Ziel dieser Arbeit ist, Schnellversuche zu entwickeln und zu untersuchen, die eine sachgerechte Güteüberwachung mineralischer Basisabdichtungen ermöglichen. Als Ergebnis werden Empfehlungen für die Güteüberwachung mineralischer Deponiebasisabdichtungen erarbeitet, mit denen im Gegensatz zum bisher üblichen Vorgehen unmittelbarer Einfluß auf die Herstellung genommen werden kann.

1.3 Aufbau der Arbeit

Im ersten Teil der Arbeit werden die Herstellverfahren mineralischer Basisabdichtungen sowie die Eigenschaften der verwendeten Materialien beschrieben und die sich daraus ableitenden Anforderungen an die Qualitätssicherung und Güteüberwachung herausgearbeitet. Es wird erläutert, daß die Qualitätssicherung mineralischer Deponiebasisabdichtungen des Einsatzes anderer, schnellerer Prüfverfahren bedarf als bisher üblich.

Im zweiten Teil werden durch Auswertung des Schrifttums die Möglichkeiten der Anwendung von Schnellverfahren zur Güteüberwachung mineralischer Basisabdichtungen untersucht. Dabei werden Unterschiede zu den üblichen, zumeist genormten Prüfverfahren aufgezeigt. Am Ende dieses Teils werden die erfolgversprechenden Schnellverfahren für eigene Untersuchungen ausgewählt.

Im dritten Teil der Arbeit werden die ausgewählten Schnellverfahren näher untersucht. Die Ermittlung der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der möglichen Schnellverfahren ist dabei von besonderer Bedeutung. Maßstab ist der Vergleich genormter Verfahren mit den baustellengerechten Schnellverfahren.

Im vierten Teil der Arbeit wird die Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse auf zwei Baustellen gezeigt. Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen werden Empfehlungen für die Güteüberwachung mineralischer Deponiebasisabdichtungen formuliert.

2. HERSTELLUNG MINERALISCHER DEPONIEBASISABDICHTUNGEN

2.1 Historische Entwicklung

Die in allen Kulturstaaten etwa Mitte des vorigen Jahrhunderts durchgeführte erste Reform der Städtereinigung war vor allem darauf ausgerichtet, flüssige Abfälle über eine Schwemmkanalisation in den nächsten Vorfluter abzuleiten und feste Abfälle aus der Stadt herauszutransportieren, um sie irgendwo im Gelände abzulagern. Während man der Gefahr durch die Abwassereinleitungen bald durch den Bau von Kläranlagen begegnete, wurde noch vor etwa 20 Jahren die Zahl ungeordneter Müllkippen in Deutschland auf etwa 50.000 geschätzt.

Die Entwicklung von abdichtenden Schichten für die Basis von Abfalldeponien hat in Deutschland erst in den letzten beiden Jahrzehnten begonnen. Das Merkblatt für Deponien (N.N. 1969) geht noch vom planmäßigen Austritt von Sickerwässern aus Deponien und einer *zumindest örtlich nachteiligen Veränderung des Grundwassers* aus. Es war in jedem Einzelfall zu prüfen, ob besondere Maßnahmen zum Grundwasserschutz erforderlich sind. Diese Prüfung wurde nach den Kriterien Grundwasserfließrichtung und -geschwindigkeit durchgeführt. Falls Abdichtungen für erforderlich gehalten wurden, war für mineralische Abdichtungen nur folgendes vorgeschrieben:

In den Fällen, wo eine Dichtung des Untergrundes vorgenommen werden muß, soll dieses mit geeigneten Materialien geschehen. Bewährt haben sich fachgemäß eingebaute, gegen Austrocknung geschützte Ton- und Lehmdichtungen in ausreichender Schichtdicke entsprechend der Qualität des Dichtungsmaterials, mindestens jedoch 20 cm geschehen. Auch Vermörtelungen mit Kalk, Zement, Kalkschlamm oder Karbidschlamm mit einem Wassergehalt unter 60 % kommen in Betracht. (N.N. 1969)

Nach dem Erlaß des Abfallbeseitigungsgesetzes im Jahr 1977 begann die Entwicklung von den Müllkippen früherer Jahre zu den heute üblichen Zentraldeponien der Landkreise. Die Ausstattung dieser Deponien war zunächst durch das Merkblatt M3 der Länderarbeitsgemein-

schaft Abfall (N.N. 1979) geprägt. Hier wurde eine Unterteilung in natürliche und künstliche Abdichtungen vorgenommen.

Natürliche Abdichtungen bestanden danach aus Bodenmaterial mit ausreichend hohen Ton- und Feinschluffanteilen. Eine Mindeststärke von 60 cm bei lagenweisem Einbau und einem Wasserdurchlässigkeitsbeiwert von mindestens $1 \cdot 10^{-8}$ m/s waren gefordert. Eignungsprüfungen oder Güteüberwachungen waren nur allgemein angesprochen. Aus dieser Zeit stammen erste Veröffentlichungen zum Stand der Technik (z.B. Stief 1979), aber auch über Materialuntersuchungen (z.B. Hänsel 1981 und Steffen 1981).

In der Folgezeit wurden Verbesserungen vor allem durch Untersuchung und Optimierung des Abdichtungsmaterials erreicht. Der in Veröffentlichungen, aber auch Genehmigungsbescheiden geforderte Durchlässigkeitsbeiwert wurde immer kleiner. Teilweise wurden Werte von $k \leq 1 \cdot 10^{-10}$ m/s angestrebt, die sich in Eignungsprüfungen mit guten Tonen oder einer ausreichenden Bentonitzugabe auch erreichen ließen (z.B. Knüpfner, Reuter 1987). Andere Autoren berichteten über Untersuchungen zur Optimierung der Verarbeitung von mineralischem Abdichtungsmaterial (Düllmann 1987).

Etwa seit 1985 wird in Veröffentlichungen die Güteüberwachung von mineralischen Abdichtungen zunehmend diskutiert (z.B. N.N. 1986, Meseck, Sondermann 1987, Jessberger 1987b). Ein einheitlicher Standard hat sich für die Güteüberwachung jedoch weder nach Art noch nach Umfang herausgebildet.

Die Kombinationsabdichtung, die Kombination von mineralischer Abdichtung und im Preßverbund direkt aufliegender Kunststoffdichtungsbahn, wird zur Zeit als besonders wirksam angesehen (Stief 1987). Zum Thema dieser Arbeit gehört nur der mineralische Teil, an den die gleichen Anforderungen gestellt werden wie an reine mineralische Abdichtungen.

Die Diskussion um die Einführung der Technischen Anleitung Abfall (TA Abfall) und die Neufassung des Merkblatts der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) führt in jüngster Zeit zu einer Vereinheitlichung bei den Anforderungen an Abdichtungssysteme. Bild 2 zeigt

den Standardaufbau für Kombinationsabdichtungen, der dem Entwurf des LAGA-Merkblatts entnommen ist (Jessberger 1987a).

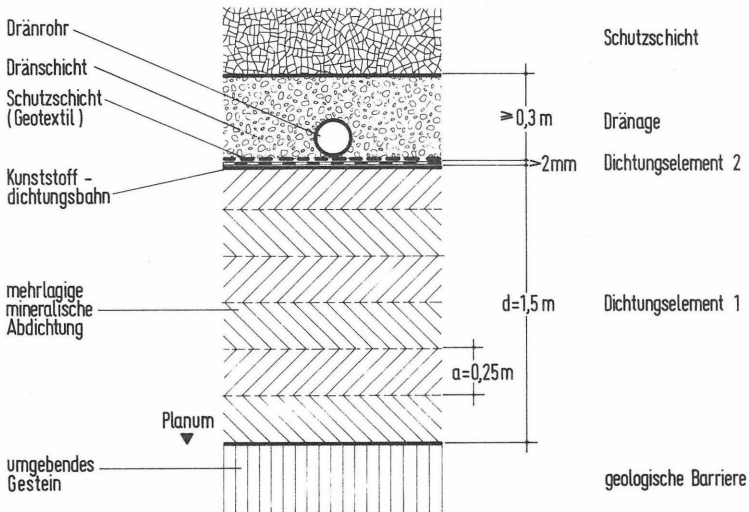


Bild 2: Aufbau des kombinierten Abdichtungssystems (nach Jessberger 1987a)

Folgende konstruktive Randbedingungen sind einzuhalten:

- Stärke der Abdichtung $d = 1,5 \text{ m}$
- Böschungsneigung $\leq 1 : 2,5$
- Einbaulagendicke $a \leq 0,25 \text{ m}$

■	Verdichtungsgrad	D_{Pr}	$\geq 0,95$
■	Einbauwassergehalt	w	$\geq w_{Pr}$
■	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert	k	$\leq 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$

Ursache für die Forderung nach einem Einbauwassergehalt über dem optimalen Wassergehalt ist die dadurch erzielbare geringere Wasserdurchlässigkeit bei gleicher Verdichtungsarbeit und gleichem Verdichtungsgrad.

Bei reinen mineralischen Abdichtungen, die in begründeten Einzelfällen auch zugelassen werden sollen, sind die gleichen Werte einzuhalten. Die Stärke der mineralischen Abdichtung ist dann jedoch mit $d = 3 \text{ m}$ zu wählen.

2.2 Stand der Technik

Die Herstellung mineralischer Deponiebasisabdichtungen ist eine besondere Erdbau-Aufgabe. Der Unterschied zu klassischen Erdbau-Aufgaben besteht darin, daß es sich mit dem Wasserdurchlässigkeitsbeiwert um einen zusätzlich einzuhaltenden Bodenkennwert handelt. Aus dieser neuen oder zusätzlichen Anforderung ergeben sich einige neue oder zusätzliche Arbeitsgänge. Die dafür eingesetzten Geräte und Technologien sind aus dem Erdbau weiterentwickelt.

Die Herstellung mineralischer Basisabdichtungen hatte ihren Ursprung in der Forderung aus N.N. (1979), *bei ausreichend naturdichtem Untergrund die gesamte Deponiesohle in einer Stärke von 30 cm umzulagern und nach den Regeln der Erdbautechnik zu verdichten*. Bis heute ist erstes Ziel der Suche nach einem geeigneten Abdichtungsmaterial, am Ort anstehendes Material zu verarbeiten. Falls kein Material in zumutbarer Entfernung gefunden wurde, das ohne zusätzliche Maßnahmen geeignet war, entstanden wirtschaftliche Lösungen daraus, anstehende Materialien zu vermischen (Simons, Geil, Hänsel 1982) oder ihnen in geringen Mengen Bentonite

unterzumischen. Eine wirtschaftliche, technologisch aber anspruchsvolle Maßnahme (Steffen 1981) ist in Bild 3 dargestellt.

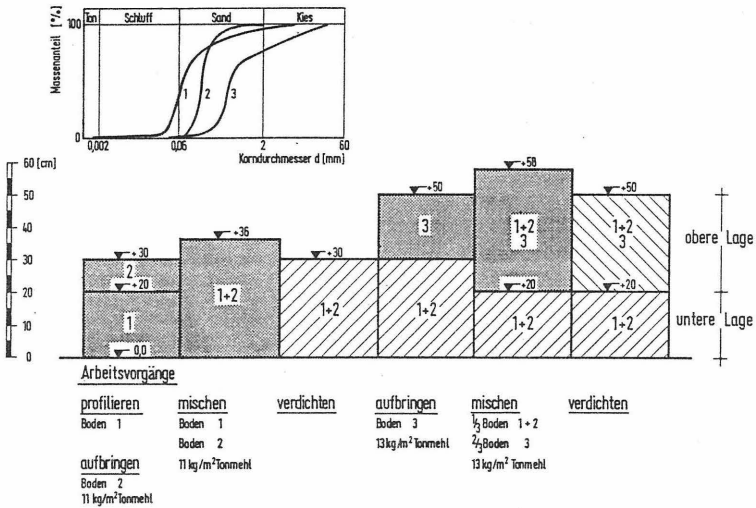


Bild 3: Arbeitsvorgänge bei der Herstellung einer unteren und oberen Abdichtungsschicht (nach Steffen 1981)

Die im folgenden dargestellte Arbeitsschritte zur Herstellung mineralischer Basisabdichtungen sind umfassend. Je nach Art und Eigenschaften des verwendeten Materials sind sie teilweise entbehrlich. Sie sind in der Reihenfolge erwähnt, wie sie üblicherweise ausgeführt werden:

- Lösen
(Bagger, Raupe, Schürfkübelraupe)

- Laden
(Bagger)
- Fördern
(LKW, Schürfkübelraupe, Förderbänder)
- Vorzerkleinern
(Fräse, Hammermühle)
- Planieren
(Raupe, Schürfkübelraupe)
- Anfeuchten
(Wasserwagen, Fräse mit Wassereindüsung)
- Bentoniteinstreuen
(Kalk- oder Düngerstreuer)
- Mischen
(Fräse, Zwangsmischer)
- Verdichten
(Walzenzug, Anhängewalze)

Ist das vorgesehene Material nicht ohne zusätzliche Maßnahmen geeignet, werden Materialien gemischt oder eingemischt. Bei allen Vorgängen des Mischens oder Einmischens von Material ist nach zwei unterschiedlichen Verfahren zu unterscheiden:

- **mixed-in-place-Verfahren**
(Ausbreiten des Grundmaterials auf dem Planum oder einem Zwischenlager, darauf Ausbringen des Mischbodens, der Zusätze und des Wassers, anschließend mechanisches Durchfräsen mit Bodenfräsen oder -eggen)

■ **mixed-in-plant-Verfahren**

(Einwiegen des Grundmaterials und aller Zuschläge in einen Zwangsmischer, Ausbringen der fertigen Mischung)

Bild 4 vermittelt einen Eindruck von einer mixed-in-place-Baustelle mit Raupe, Bentonitstreuer, Wasserwagen, Fräse und Walze.

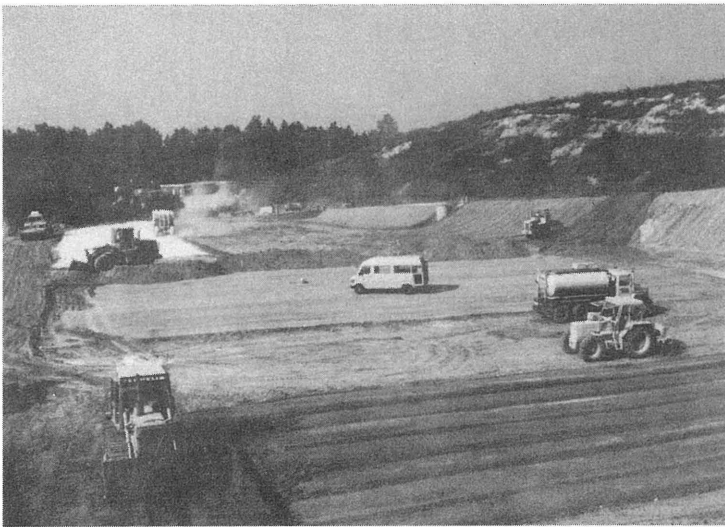


Bild 4: mixed-in-place-Baustelle

Das Leistungsvermögen moderner Mischanlagen für Böden mineralischer Basisabdichtungen wird in Bild 5 deutlich. Mit der dargestellten Anlage wird ein Gemisch aus 82 % gebrochenem

Granit 0-32 mm, 15 % breiigem Kieswaschmaterial und 3 % Bentonit verarbeitet. Die Produktionsleistung liegt bei maximal 180 t/h.

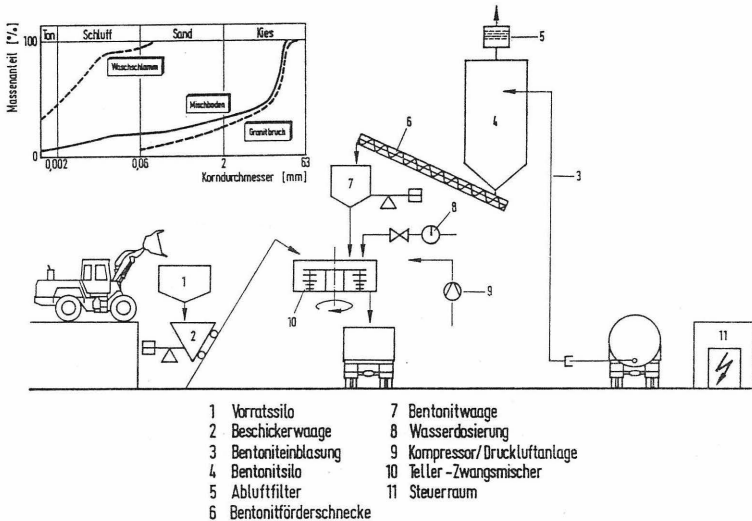


Bild 5: Fließschema und Materialzusammensetzung einer Mischanlage für Bodenmaterial

Mit den beschriebenen Verfahren steht ein Instrumentarium zur Verfügung, mit dem mineralische Basisabdichtungen auch mit schwierigen Böden zu hochwertigen Abdichtungsschichten zu verarbeiten sind.

Die Praxis der Güteüberwachung mineralischer Basisabdichtungen orientiert sich heute vor allem an der im Erdbau üblichen Vorgehensweise (N.N. 1976). Dies gilt sowohl für die zu bestimmenden Kennwerte als auch für die Häufigkeit der Beprobung. Im Erdbau ist vor allem der Verdichtungsgrad nachzuweisen. Die Einhaltung üblicher Verdichtungsgrade ist jedoch - normale Baustellenverhältnisse vorausgesetzt - mit modernen Erdbaugeräten kein besonderes

bautechnisches Problem. Entsprechend gering wird die Bedeutung der Güteüberwachung in der Baupraxis eingeschätzt.

Die Herstellung von mineralischen Basisabdichtungen ist eine Erdbau-Aufgabe mit neuen Anforderungen bei nicht immer leicht zu gewährleistenden Eigenschaften der fertigen Abdichtung. Diesen neuen Aufgaben ist der Erfahrungsstand des Personals in vielen Firmen nicht gewachsen. Eine umfassende Bauüberwachung und ständige, baubegleitende Qualitätskontrolle ist deshalb bei der Herstellung mineralischer Basisabdichtungen unabdingbar. Hierfür geeignete Versuche auf ihre Durchführbarkeit und Reproduzierbarkeit zu untersuchen und eine Vorgehensweise zu entwickeln, ist der Anlaß für die vorliegende Arbeit.

3. EIGENSCHAFTEN MINERALISCHER BASISABDICHTUNGEN

3.1 Allgemeines

Für die Herstellung mineralischer Deponiebasisabdichtungen werden Lockergesteine verwendet. Lockergesteine entstehen durch Verwitterung. Ihre Entstehungsgeschichte und ihr Verwitterungsgrad prägen ihre Eigenschaften. Die Bodenmechanik ermittelt die Eigenschaften dieser Lockergesteine nach heute in der Regel genormten Verfahren.

3.2 Bodenmechanische Eigenschaften

Die Untersuchung der bodenmechanischen Eigenschaften dient dazu, den Boden zu klassifizieren. Zur Klassifizierung der Bodenarten werden die Lockergesteine für bautechnische Zwecke nach DIN 18.196 in Gruppen mit annähernd gleichem stofflichem Aufbau und ähnlichen bodenphysikalischen Eigenschaften zusammengefaßt. Nach Jessberger (1987b) sind bei Eignungsprüfungen für mineralische Basisabdichtungen die in Bild 6 zusammengestellten Untersuchungen durchzuführen. Dabei ist die in natürlichen Lagerstätten meist zu erwartende Streubreite der Kennwerte durch eine ausreichende Anzahl repräsentativer Proben zu berücksichtigen und zu dokumentieren.

Seit Jahrzehnten wird von zahlreichen Autoren versucht, zwischen den einzelnen Bodenkennwerten Korrelationen herzustellen. Ziel dieser Untersuchungen war im allgemeinen immer, Aufwand für umfassende Versuche zu sparen und durch wenige typisierende Versuche zu ersetzen. Die Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften der für Basisabdichtungen in Frage kommenden feinkörnigen Böden haben zum Beispiel Leussink et al. (1964) und Kezdi (1969) untersucht. Leussink et al. stellten Mischungen aus Tonen und Sanden her, um die bodenmechanischen Eigenschaften der Mischböden durch kontrollierte Änderung einzelner

Kennwerte zu untersuchen. Bild 7 zeigt beispielhaft die nahezu lineare Abhängigkeit der Plastizität vom Tonanteil der Mischung.

Kennwert	zu bestimmen nach
Korngrößenverteilung	DIN 18.123
Zustandsgrenzen	
Fließgrenze	
Ausrollgrenze	
Schrumpfgrenze	DIN 18.122
organische Bestandteile	DIN 18.128 (Vorb.)
Korndichte	DIN 18.124
Kalkgehalt	DIN 18.129 (Vorb.)
Wasseraufnahme	Neff (1959)
Wassergehalt	DIN 18.121
Dichte	DIN 18.125

Bild 6: Kennwerte zur bodenphysikalischen Klassifizierung von mineralischen Abdichtungsmaterialien für Deponien (nach Jessberger 1987b)

Einen weitreichenden Ansatz zur Korrelation von bodenphysikalischen Kennwerten macht Neff 1959 und 1988. Er ermittelte einen Zusammenhang zwischen dem Wasseraufnahmevermögen eines Bodens (Enslin 1933) und den Kennwerten Proctordichte, optimalem Wasser-

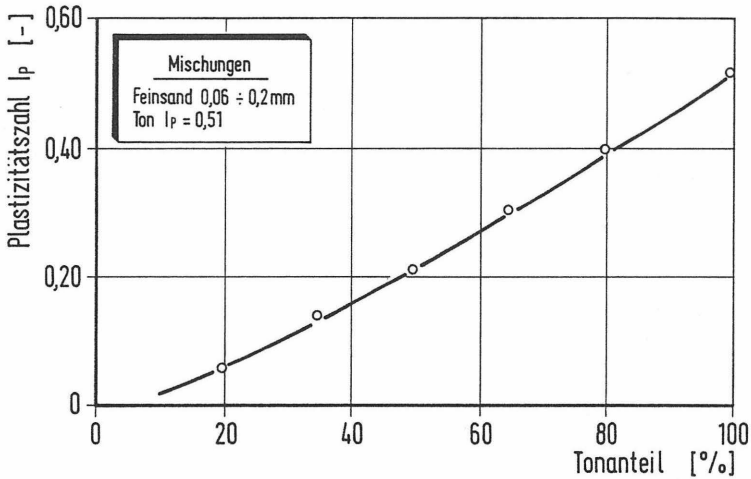


Bild 7: Abhängigkeit der Plastizitätszahl eines Mischbodens vom Tonanteil (nach Leussink et al. 1964)

gehalt, Konsistenzgrenzen und Scherfestigkeiten. Danach kennzeichnet die Wasseraufnahme (nach Neff 1959: Wasserbindevermögen w_b) eines Bodens vor allem die Zustandsgrenzen eines bindigen Bodens mit allen davon abgeleiteten und abhängigen Werten. Beispielhaft zeigt Bild 8 die von Neff 1959 vorgestellten Beziehungen zwischen dem Wasserbindevermögen einerseits und der Proctordichte und dem optimalen Wassergehalt andererseits.

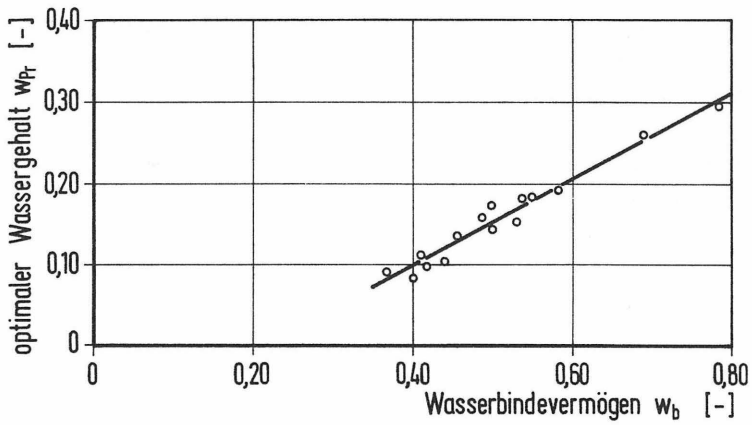
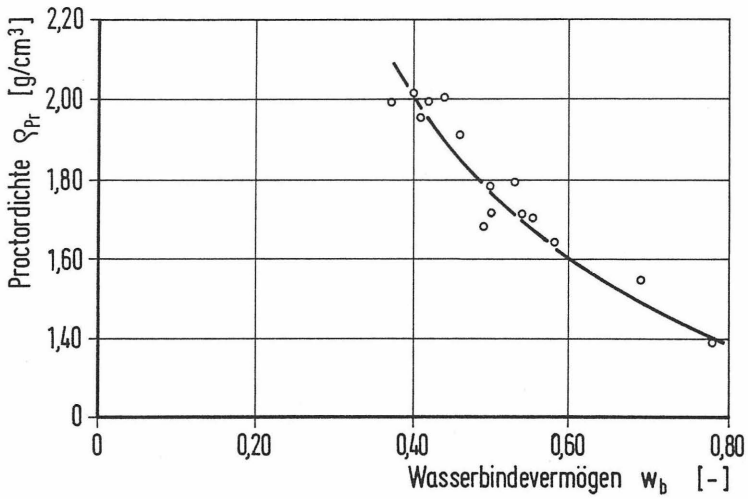


Bild 8: Beziehungen zwischen dem Wasserbindevermögen und Kennwerten des Proctorversuchs bindiger Böden (nach Neff 1959)

Nach Neff (1959) können für jedes Bodenvorkommen Eichkurven über die Zusammenhänge zwischen dem Wasserbindevermögen und anderen Bodenkennwerten aufgestellt werden. Dann kann ohne weiteres aus dem Wasserbindevermögen auf die Homogenität des Materials und gegebenenfalls auf Änderung der bodenphysikalischen Eigenschaften geschlossen werden.

3.3 Durchlässigkeitsverhalten

Mineralische Deponiebasisabdichtungen werden aus gewachsenen Böden in einem maschinellen Vorgang hergestellt. Es ist also die Durchlässigkeit eines aufbereiteten Materials zu beurteilen. Dadurch hängt das Durchlässigkeitsverhalten des Materials nicht nur von der mineralogischen Zusammensetzung und den bodenphysikalischen Kennwerten, sondern auch von Einbaukennwerten, insbesondere von der Verdichtung ab. Die Durchlässigkeit eines Bodens wird heute in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt und der bei definierter Verdichtungsarbeit erzielten Trockendichte dargestellt. Als Maßstab für die Verdichtungsenergie gilt im allgemeinen der einfache Proctorversuch nach DIN 18.127 mit $A = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ oder der modifizierte Proctorversuch mit $A = 2,7 \text{ MNm/m}^3$. Die Ermittlung und Darstellung dieses Zusammenhangs wird auch in Jessberger (1987b) gefordert. Bild 9 zeigt beispielhaft diese Abhängigkeit.

Muradi (1976) geht noch weiter und gibt für den Zusammenhang zwischen Einbauwassergehalt und erreichter Trockendichte für verschiedene Verdichtungsenergien Linien gleicher Durchlässigkeiten für einen Opalinuston an (Bild 10).

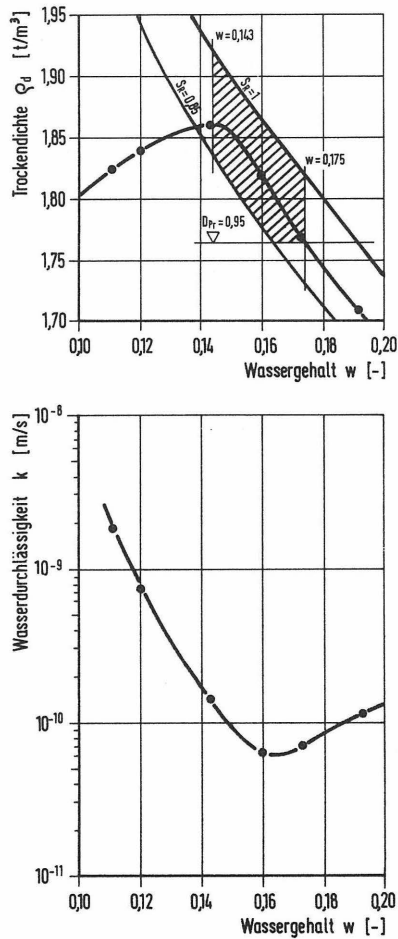


Bild 9: Zusammenhang zwischen Trockendichte, Einbauwassergehalt und Wasserdurchlässigkeit von Proben bei der Verdichtungsarbeit für den einfachen Proctorversuch (Knüpfner 1987)

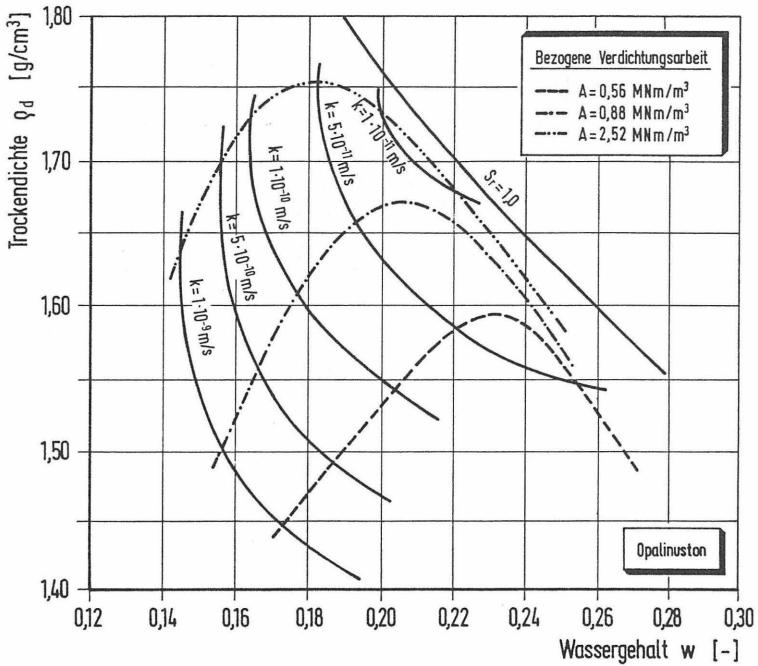


Bild 10: Linien gleicher Durchlässigkeit für verschiedene Einbauwassergehalte und Trockendichten (Muradi 1976)

Die Kenntnisse lassen sich aufgrund des Schrifttums und eigener Erfahrungen so zusammenfassen:

- mit steigendem Wassergehalt auf dem trockenen Ast der Proctorkurve fällt die Durchlässigkeit stark und erreicht erst bei Wassergehalten über dem optimalen Wassergehalt den niedrigsten Wert

- bei weiter steigendem Wassergehalt steigt auch die Durchlässigkeit wieder leicht
- bei höheren Verdichtungsenergien können auch bei unter dem optimalen liegenden Wassergehalten niedrigere Durchlässigkeiten erreicht werden
- der dargestellte Zusammenhang gilt für alle Bodenarten, die für mineralische Basisabdichtungen geeignet sind, also auch für nur leicht plastische Böden, bei denen gegebenenfalls eine Bentonitzugabe erforderlich ist.

Dieser Zusammenhang ist für Eignungsprüfungen genügend abgesichert, da hier von einer homogenen Probe ausgegangen werden kann. Auch jüngste behördliche Vorschriften (N.N. 1986) gehen davon aus, daß dieser Zusammenhang auf Güteüberwachungen übertragen werden kann. Dabei wird vorausgesetzt, daß die mögliche Schwankungsbreite der bodenphysikalischen Kennwerte bereits durch die Eignungsprüfung abgedeckt ist. Nach Knüpfer und Reuter (1987) wurde bei den 126 Proben einer Güteüberwachung, die auf Durchlässigkeit, Verdichtungsgrad und bodenphysikalische Kennwerte untersucht wurden, die Abhängigkeit der Durchlässigkeit vom Einbaukennwert Wassergehalt aus der Eignungsprüfung grundsätzlich bestätigt (Bild 11). Die Schwankungsbreite ist jedoch erheblich und wird auf die im Zusammenhang zwischen Durchlässigkeit sowie Dichte und Wassergehalt nicht berücksichtigte Schwankung der Zusammensetzung des Grundmaterials zurückgeführt. Als Beispiel hierfür wird die Schwankung des Tonanteils (Feinstkorn $\leq 0,002$ mm) der 126 Proben angeführt (Bild 12).

Wie oben schon erwähnt, gelten die Zusammenhänge, die das Durchlässigkeitsverhalten beeinflussen, grundsätzlich auch bei Verbesserung des Bodens mit Bentonit. Die Möglichkeiten der Verbesserung eines Bodens mit Bentonit wurden von Schuster (1986) untersucht. In welchen Bereichen dies möglich ist, zeigt das Bild 13.

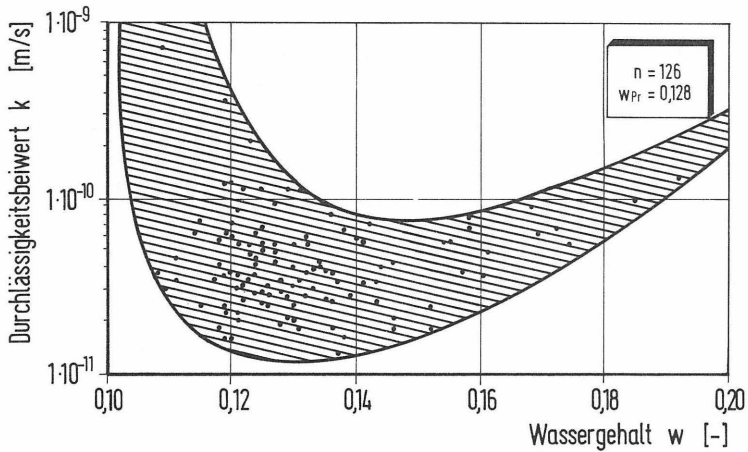


Bild 11: Durchlässigkeitsbeiwerte einer Güteüberwachung in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt (nach Knüpfer, Reuter 1987)

Einem tonfreien, nur etwa 10 % Schluff enthaltenden Sand wurden verschiedene Tone zugegeben. Dabei bewirkt die Zugabe von 8 % des kaum quellfähigen Opalinustones eine Verringerung der Durchlässigkeit von $k = 5 \cdot 10^{-7}$ m/s auf $k = 7 \cdot 10^{-9}$ m/s. Die Zugabe von 8 % Kalziumbentonit verringert die Durchlässigkeit bereits auf $k = 3 \cdot 10^{-10}$ m/s. Durch 8 % hochquellfähigen Natriumbentonit läßt sich eine Verringerung der Durchlässigkeit auf $k = 2 \cdot 10^{-11}$ m/s erreichen.

Dem Verfahren des Zumischens von Bentonit ist neben der Wirtschaftlichkeit vor allem eine Grenze durch das Kriterium der Erosionssicherheit gesetzt.

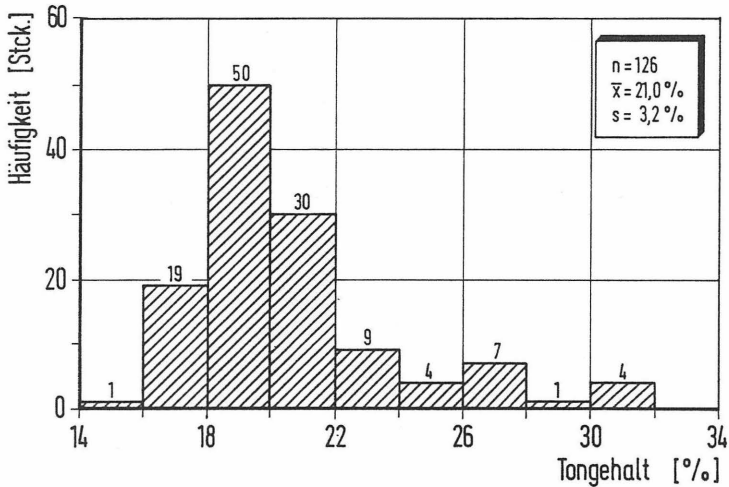


Bild 12: Ermittelte Häufigkeitsverteilung des Tongehaltes bei der Güteüberwachung (nach Knüpfer, Reuter 1987)

3.4 Erforderliche Eigenschaften des Abdichtungsmaterials

Zur Herstellung von mineralischen Basisabdichtungen sollte nur mineralisches Material mit ausreichendem Feinkornanteil verwendet werden. Nach Jessberger (1987b) und Drescher (1988) kommen vor allem die feinkörnigen Bodenarten UM, TL, TM und TA nach DIN 18.196, in Sonderfällen auch die gemischtkörnigen Bodenarten GT und ST bei einem Feinkornanteil von mindestens $20 \% < 0,002 \text{ mm}$ in Frage. Nur wenige Autoren geben Grenzwerte für die Eignung des Materials an. Bechtle (1979) nennt Grenzwerte in Abhängigkeit von der unterschiedlichen hydrogeologischen Gefährdung des Grundwassers. In Anbetracht der heutigen hohen Anforderungen an den Grundwasserschutz wird zum Vergleich nur die höchste Gefährdungsklasse betrachtet. Grenzwerte finden sich weiter bei Drescher (1988), der das Arbeitspapier "Deponiedichtungen für Sonderabfalldeponien" der Arbeitsgruppe 2 der TA Abfall vorstellt. In Bild 14 sind die von beiden Autoren genannten Werte gegenübergestellt.

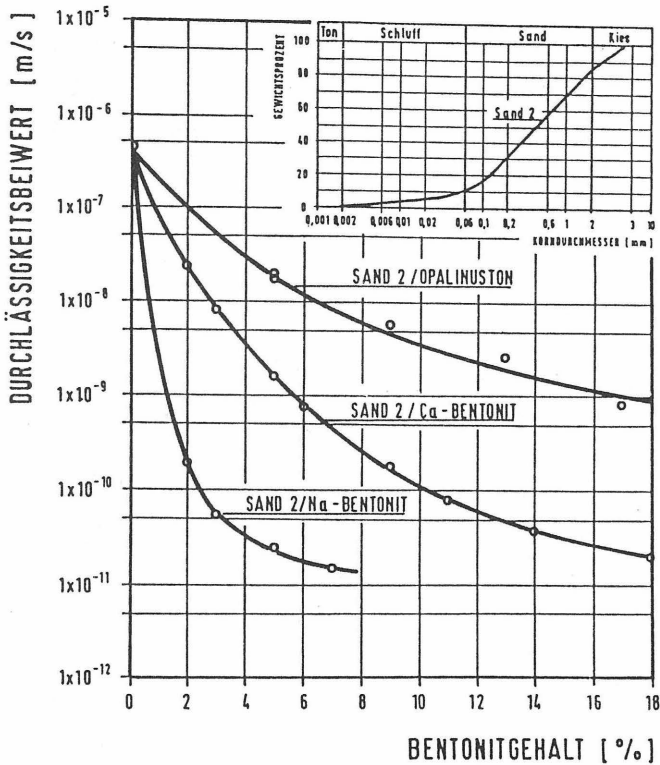


Bild 13: Durchlässigkeitsbeiwerte für einen Sand bei Zugabe verschiedener Bentonite (nach Schuster 1986)

Dabei und auch bei anderen Autoren fällt auf, daß die Anzahl der vorgeschlagenen Grenzwerte geringer geworden ist. Über die Bedeutung eines einzelnen Bodenkennwertes für die Qualität einer Abdichtungsschicht besteht noch keine Klarheit. Eindeutig ist die Forderung nach ausreichender Plastizität wegen der besseren Verformbarkeit des Materials. Da Plastizität nur vom Feinstkorn zu erwarten ist, erklärt sich schon allein daraus die Forderung nach

einem Mindesttongehalt. Hinzu kommt, daß das Adsorptionsvermögen ebenfalls vor allem vom Feinstkornanteil abhängt.

Kennwert	Dim.	Bechtle 1979	Drescher 1988
Tonanteil $< 2 \mu\text{m}$	%	> 23	> 20
Grobanteil $> 2 \text{ mm}$	%	< 30	k.A.
Fließgrenze w_L	-	$> 0,55$	k.A.
Konsistenz I_C	-	$> 0,95$	k.A.
Proctordichte ρ_{Pr}	g/cm^3	$> 1,68$	k.A.
Verdichtungsgrad D_{Pr}	-	$> 0,98$	$> 0,95$
Luftporenanteil n_a	-	$< 0,02$	k.A.
Wasserdurchlässigkeit k	m/s	$< 6 \cdot 10^{-10}$	$< 5 \cdot 10^{-10}$
Organ. Substanz v_{gl}	-	$< 0,005$	$< 0,05$
Kalkgehalt v_{ca}	-	k.A.	$< 0,30$

Bild 14: Zusammenstellung von Grenzwerten für mineralisches Abdichtungsmaterial

Die oft vorgeschlagene Begrenzung des Kalkgehaltes und des Gehaltes an organischen Bestandteilen hat ihre Ursache mehr in der Beurteilung der Langzeitwirkung und der Beständigkeit der Abdichtung.

Weitere Anforderungen an das Material sind schon länger allgemein üblich und in jedem Einzelfall beschrieben, im genannten Arbeitspapier zur TA Abfall jedoch einheitlich formuliert:

Das Dichtungsmaterial muß in der Lage sein, Untergrundverformungen bruchlos (plastisch) folgen zu können. Es muß homogen sein und einen gleichmäßigen Einbauwassergehalt besitzen. ...Bei stückigem Material ist darauf zu achten, daß

nach dem Einbau Bodenstücke nicht größer als 32 mm sind. Sie müssen den gleichen Wassergehalt wie das andere Dichtungsmaterial aufweisen. Böden mit Grob- kies und Steinen sowie Holz, Wurzeln und anderen Fremdstoffen sind von der Ver- wendung als Dichtstoff auszuschließen, es sei denn, diese Stoffe können sicher aus- gesondert werden.

Stief (1987) beklagt, daß die mineralogische Zusammensetzung von Tonen für Basisabdich- tungen bisher nicht einmal dokumentiert wird, um später, wenn die tatsächliche Sickerwasser- zusammensetzung gemessen werden kann, Abschätzungen über die Auswirkungen auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert durchführen zu können. Die Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" (Jessberger 1987b) schlagen einfache mineralogi- sche Untersuchungen vor. Jedoch haben die umfangreichen Untersuchungen zu diesem Thema an der Technischen Universität München (Kohler, Morteani 1984 und Kohler 1986), der ETH Zürich (z.B. Müller-Vonmoos et al. 1987 und Hasenpatt, Degen, Kahr 1988) und der Technischen Universität Karlsruhe (Czurda 1987) noch keine Bewertungskriterien oder Grenzwerte für die Eignung von Tonen für Deponiebasisabdichtungen aus mineralogischer Sicht ergeben.

Reichen die Eigenschaften eines Bodens nicht aus, die Anforderungen an ein Abdichtungs- material zu erfüllen, ist es seit Jahren geübte Praxis, den Boden durch Zugabe von Bentonit zu verbessern. Bentonit ist ein Ton, der überwiegend aus dem Tonmineral Montmorillonit be- steht. Tonminerale haben große Oberflächen. Nach Müller-Vonmoos et al. (1987) weist Montmorillonit gegenüber dem Tonmineral Illit eine etwa 8fache Oberfläche bei fast gleicher Korngrößenverteilung auf. Dies wird darauf zurückgeführt, daß Montmorillonit innerkristallin quellen kann. Diese innerkristalline Quellung ist die Hauptursache für die sehr geringe Durchlässigkeit von Tonen mit hohem Montmorillonitgehalt.

Der Aufbau der Tonminerale ist von Hoffmann (1942 und 1956) beschrieben.

Bild 15 zeigt die Zusammensetzung und die Eigenschaften der handelsüblichen Bentonite für Basisabdichtungen.

Kennwerte	Anteil
SiO ₂	58 %
Al ₂ O ₃	20 %
Fe ₂ O ₃	5 %
MgO	4 %
Na ₂ O	2 %
CaO	2 %
K ₂ O	1 %
Glühverlust	8 %
Wasserbindevermögen	300-600 %
Montmorillonit	70-75 %
Illit	15-25 %
Quarz	5 %

Bild 15: Zusammensetzung von Bentonit für Deponiebasisabdichtungen

Die für Basisabdichtungen verwendeten Bentonite unterscheiden sich vor allem in der Art der Ionenbelegung, was wiederum die Quellsfähigkeit beeinflusst. Versuchstechnisch wird die Quellsfähigkeit durch das Wasserbindevermögen w_b nach Enslin/Neff (Neff 1959) bestimmt. Dieser Kennwert wird in der Regel im Bentonithandel oder in Ausschreibungen für Basisabdichtungen als Qualitätskriterium vereinbart.

4. QUALITÄTSSICHERUNG MINERALISCHER BASISABDICHTUNGEN

4.1 Allgemeines

Nach Meyer (1986), Eustacchio (1988), Dürr (1987), Floss (1984) und anderen Autoren wird der Begriff Qualitätssicherungssystem als ganzheitliche Aufgabe aller an einer Bauaufgabe Beteiligten verwendet. Er umfaßt damit mehr als eine bloße Materialprüfung.

Meyer (1986) teilt die Aufgaben der Qualitätssicherung in die Elemente

- Definition der Qualitätsanforderungen
- Organisation der Qualitätssicherung
- Personalqualifikation
- Arbeits- und Ausführungsanweisungen
- Überprüfung von Planung, Entwicklung und Konstruktion
- Eingangskontrolle von Fremdlieferungen und Fremdleistungen
- Kontrolle von Baustoffen und Komponenten, Kennzeichnung
- Überwachung während bestimmter Phasen des Herstellprozesses
- Prüfung des Produktes
- Überprüfung von Meß- und Versuchseinrichtungen
- Vorgehen bei Abweichungen
- Dokumentation
- Überprüfung des Qualitätssicherungssystems

Eustacchio (1988) bezieht die Aufgabe der Qualitätssicherung nur auf den eigentlichen Produktionsprozeß. Bild 16 verdeutlicht dies, wenn seine Ergebnisse auf den Herstellungsprozeß einer mineralischen Basisabdichtung übertragen werden.

Für mineralische Deponiebasisabdichtungen sind die bekanntesten und gebräuchlichsten Einzelelemente der Qualitätssicherung die Eignungsprüfung des Abdichtungsmaterials und die Überwachung während bestimmter Phasen des Herstellprozesses, die Güteüberwachung.

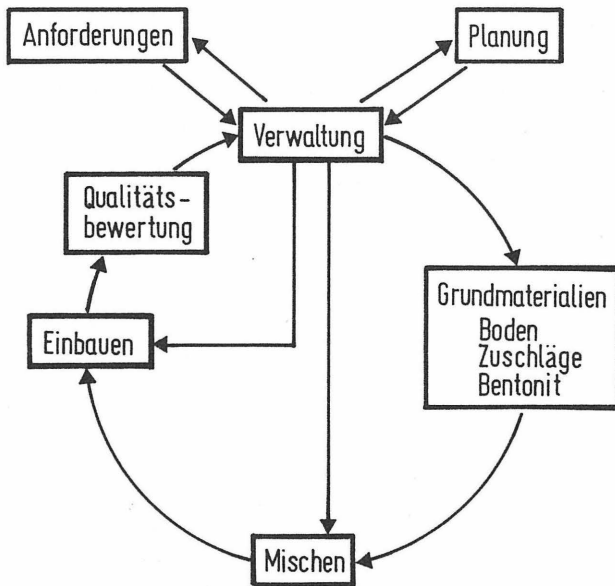


Bild 16: Darstellung des Qualitätskreises "Bau einer Basisabdichtung" (nach Eustacchio 1988)

4.2 Eignungsprüfung mineralischer Basisabdichtungen

4.2.1 Allgemeines

Eignungsprüfungen des in Bild 14 beschriebenen Umfangs sind in Zukunft nach Drescher (1988) vor Einreichen des Antrags auf Planfeststellung durchzuführen. Der Nachweis der Eignung ist vor allem durch Laborversuche zu erbringen.

4.2.2 Probefelder

Es ist heute allgemein üblich, vor Beginn der Herstellung mineralischer Basisabdichtungen ein oder mehrere Probefelder herzustellen. Die Probefelder gehören nicht zum Bereich der Güteüberwachung, sondern definitionsgemäß zur Eignungsprüfung. Allerdings ist die Ausführung auf einen Zeitpunkt kurz vor Baubeginn zu legen, wenn als Ergebnis der Ausschreibung der ausführende Unternehmer feststeht. Sie sind auch für die Güteüberwachung von großer Bedeutung.

Zweck der Probefelder ist der Nachweis der Eignung des Abdichtungsmaterials, die Bestimmung des geeigneten Verdichtungsgerätes, der günstigsten Schichtstärke, der für die Homogenisierung und Verdichtung des Materials erforderlichen Arbeitsgänge sowie der Nachweis der Abnahmekriterien, insbesondere die Bestätigung der in der Eignungsprüfung ermittelten Eigenschaften und Zusammenhänge.

Die Anlage von Probefeldern ist im Erdbau üblich. Die Durchführung von Probeerddichtungen ist in N.N. (1968) beschrieben. Die Darstellungen wurden von Drescher (1988) im wesentlichen übernommen. Bild 17 zeigt die Abmessungen eines Probefeldes mit einer Prüfeinheit für eine Lage. Bei weiteren Lagen oder weiteren Prüfeinheiten (z.B. verschiedene Zahl von Übergängen) ist das Probefeld entsprechend zu erweitern.

Damit die Ausführung eines Probefeldes sinnvoll genutzt werden kann, ist es erforderlich, daß Gewinnung und Einbau des Grundmaterials, gegebenenfalls die Zugabe von Bentonit und Wasser sowie die Homogenisierung des Materials der vorgesehenen Bauausführung entsprechen.

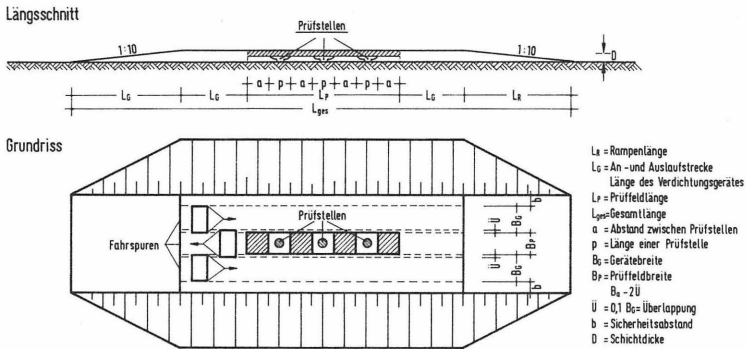


Bild 17: Probefeld mit einer Prüfeinheit für eine Schütthöhe

4.3 Güteüberwachung mineralischer Basisabdichtungen

4.3.1 Allgemeines

Nach Drescher (1988) teilen sich die Aufgaben der Güteüberwachung in die Teilaufgaben

- **Eigenkontrolle (E)**
des Herstellers durch eigene Kräfte oder durch beauftragte Institution
- **Fremdprüfung (F)**
durch unabhängige Institution im Auftrag des Bauherrn in Abstimmung mit der Genehmigungsbehörde
- **Überwachung (B)** (Behördliche Überwachung)
unabhängige Kontrollen durch die Überwachungsbehörde

Zahlreiche Autoren (z.B. Meseck, Sondermann 1987, Steffen 1979 und Horn 1988) haben Angaben über den erforderlichen Umfang, die zu prüfenden Kennwerte und die Prüfmethoden für Güteüberwachungen gemacht, die sich zum Teil widersprechen. In N.N. (1986) finden sich vorläufige Regelungen zu Art und Umfang der Fremdüberwachung. Die TA Abfall wird detaillierte Regelungen zum gesamten Problemkreis der Qualitätssicherung enthalten (Drescher 1988).

4.3.2 Aufgaben der Güteüberwachung

Nach den bereits mehrfach zitierten behördlichen Vorschriften sowie den gültigen oder geplanten Empfehlungen verschiedener Institutionen ist die vordringliche Aufgabe der Güteüberwachung die Dokumentation von Qualitätsmerkmalen zum Zweck der behördlichen Abnahme der Basisabdichtung. Hierfür spielt die für Versuche erforderliche Zeit eine untergeordnete Rolle.

Überträgt man jedoch die Ergebnisse, die Eustacchio (1988) bei seinen Untersuchungen zur Qualitätssicherung im Asphaltstraßenbau gewonnen hat, auf mineralische Basisabdichtungen, so ist die entscheidende Aufgabe der Güteüberwachung die Steuerung der Produktion. Diese Forderung ist in Bild 18 anschaulich dargestellt. Die Güteüberwachung muß deshalb ein dynamischer, baubegleitender Prozeß sein, dessen Ergebnisse möglichst unmittelbar zur Verfügung stehen sollten.

4.3.3 Umfang der Güteüberwachung

Ebenso wie bei der Eignungsprüfung sind Art und Umfang der bei der Güteüberwachung mineralischer Deponiebasisabdichtungen zu ermittelnden Kennwerte nicht detailliert festgelegt. Bild 19 zeigt die Zusammenstellung der Angaben verschiedener Autoren. Dabei kommt der Arbeit von Drescher (1988) besondere Bedeutung zu, weil sie den derzeitigen Bearbeitungsstand der TA Abfall wiedergibt.

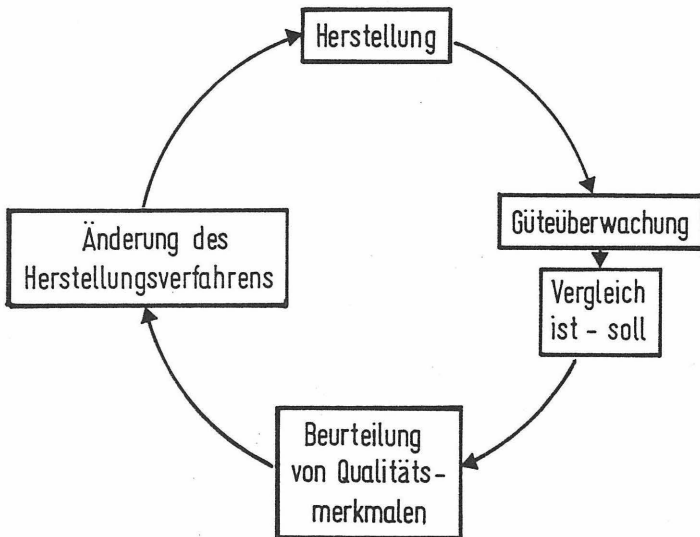


Bild 18: Ablauf und Aufgabe der Güteüberwachung (nach Eustacchio 1988)

Über die angegebenen Kennwerte hinaus sind einige weitere Regelungen von Bedeutung. Gegenüber den beiden anderen Autoren wird bei Drescher die Bestimmung der Durchlässigkeit wieder zum Regelversuch für die Abnahme einer Basisabdichtung gemacht. In beiden anderen Arbeiten wird die Durchlässigkeitsbestimmung bei der Güteüberwachung nicht gefordert, sondern durch die Ermittlung von Hilfskriterien - in der Regel Dichte und Wassergehalt - ersetzt. Grund für diese Regelung war die für die Durchlässigkeitsbestimmung erforderliche Versuchszeit. Wenn auch für Güteüberwachungen die Durchlässigkeitsprüfung nach den jüngsten Vorstellungen (Drescher 1988, Jessberger 1987b) wieder eingeführt werden soll, ist nach eigenen Erfahrungen hierfür eine Versuchszeit von mehreren Wochen für einen Einzelversuch erforderlich. Dabei stoßen, vor allem in Verbindung mit der geforderten Probenzahl, alle für die Güteüberwachung in Frage kommenden Institute an Kapazitätsgrenzen. Dieses Problem ist bei Drescher (1988) zwar erkannt, aber nicht befriedigend gelöst:

KENNWERT	DIM.	MESECK, SONDERMANN 1987			N.N. 1986	DRESCHER 1988
		Fremd	Überwachung Kontroll	Gesamt		
GRUNDMATERIAL						
Kornverteilung	m ³	5.000	7.500	3.000	k.A.	k.A.
Wassergehalt	m ³	1.000	2.500	ca.700	k.A.	k.A.
ABDICHTUNG						
Kornverteilung	m ²	10.000	15.000	6.000	900	4.000
Proctordichte	m ²	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	4.000
Verdichtung DIN 18.125, T. 2	m ²	2.500	5.000	ca.1.600	900	1.000
Verdichtung radiometrisch	m ²	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	225
Stückigkeit	m ²	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	1.000
Schichtdicke	m ²	2.500	5.000	ca.1.600	k.A.	400
Bentonitzugabe	m ²	1.000	2.500	ca.700	k.A.	k.A.
Durchlässigkeit	m ²	falls Hilfskriterien unterschritten			bei begründetem Zweifel	1.000

Bild 19: Überblick über Versuchsumfang und bei Güteüberwachungen

Da die Wasserdurchlässigkeitsversuche längere Zeit in Anspruch nehmen, können die Ergebnisse nachgereicht werden. Die Ergebnisse müssen jedoch vorliegen, bevor mit dem Aufbringen des nächsten Dichtungsteilabschnittes - Sohle, Böschung - begonnen wird. Zur Abnahme eines jeden Teilabschnittes muß das Ergebnis mindestens eines Durchlässigkeitsversuches (evtl. Schnellversuch) vorliegen.

Diese Formulierung ist nicht eindeutig. Es ist zum Beispiel nicht zu erkennen, ob mit *Aufbringen des nächsten Dichtungsteilabschnittes* bereits das Aufbringen der nächsten Lage gemeint ist. Wäre dies so, würde der Durchlässigkeitsversuch der Güteüberwachung auch noch zur bauvertraglichen Abnahmekriterium erhoben, das den Bauablauf erheblich beeinflusst. Dadurch käme es zu einem ständigen Konflikt zwischen den Interessen einer konsequenten Güteüberwachung und einem für die Qualität der gesamten Abdichtung wichtigen Baufortschritt.

4.3.4 Folgerungen für die Güteüberwachung

Die beiden Aufgaben der Güteüberwachung, baubegleitend schnell Ergebnisse zu liefern und Versuchsergebnisse zur Dokumentation zu ermitteln, was einen längeren Zeitraum erfordert, sind nicht ohne weiteres vereinbar. Versuchstechniken zur Bestimmung der Kennwerte für die behördliche Abnahme sind bekannt und in Normen oder fachlichen Empfehlungen geregelt.

Besonderes Augenmerk ist noch auf die Entwicklung und Erprobung von Schnellversuchen zu richten. Ansätze dazu sind vorhanden. So schlägt Drescher (1988) zur Bestimmung der Verdichtung (Dichte und Wassergehalt) die Anwendung des radiometrischen Verfahrens vor. Da es sich hierbei tatsächlich um ein Schnellverfahren handelt, konnte der Versuchsumfang gegenüber der genormten Ausstechzylinder-Methode nach DIN 18.125 auf das vierfache erhöht werden.

Zur Ermittlung im Rahmen von Schnellverfahren kommen vor allem die Kennwerte

- Wassergehalt
- Feuchtdichte

in Frage. Die Beschränkung auf diese Kennwerte setzt allerdings voraus, daß zum Beispiel aus den Erkenntnissen der Eignungsprüfung die Streubreite des verwendeten Grundmaterials vernachlässigbar ist. Ist dies nicht der Fall, sind auch Kennwerte einzubeziehen, die das verwendete Material klassifizieren. Hierfür kommt nach Neff (1959 und 1988) der Kennwert

- Wasserbindevermögen

in Frage.

Einen Sonderfall stellt die Verbesserung des Abdichtungsmaterials mit Bentonit dar. Hier ist zusätzlich zu allen bisher genannten Versuchen die Menge und Homogenität des eingemischten Bentonits sowie die Qualität des Bentonits selbst zu ermitteln. Hierzu sind in den jüngsten Empfehlungen und Vorschriften keine Regelungen zu finden. Es sind deshalb

- Schnellversuche zur Bestimmung der Menge und homogenen Verteilung des eingemischten Bentonits

zu entwickeln.

5. VORLIEGENDE UNTERSUCHUNGEN ÜBER SCHNELLVERSUCHE FÜR DIE GÜTEÜBERWACHUNG MINERALISCHER BASISABDICHTUNGEN

5.1 Allgemeines

Im vorigen Abschnitt wurde die Notwendigkeit für die Entwicklung und Erprobung von Schnellverfahren für die Güteüberwachung mineralischer Deponiebasisabdichtungen und die dafür in Frage kommenden Kennwerte erläutert.

Für die in Frage kommenden Schnellversuche wird im folgenden der Stand der Forschung untersucht.

5.2 Bestimmung des Wasserbindevermögens

Das Wasserbindevermögen wurde erstmals von Enslin (1933) vorgestellt und von Endell et al. (1938) in die Bodenmechanik eingeführt. Bild 20 zeigt die damals vorgestellte Apparatur. Die Bodenprobe saugt Wasser aus der Meßkapillare durch den Filterstein kapillar an. Die Menge des aufgesaugten Wassers wird zu verschiedenen Zeiten an der Meßkapillare abgelesen. Die

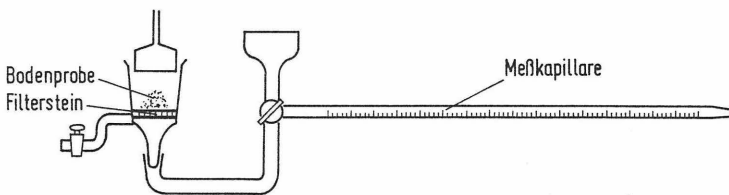


Bild 20: Vorrichtung zur Messung der Flüssigkeitsaufnahme quellbarer Stoffe (nach Enslin 1933)

im Endzustand aufgenommene Wassermenge ergibt, bezogen auf die Trockenmasse des verwendeten Bodens, das Wasseraufnahmevermögen.

Neff (1959) verbesserte die Apparatur vor allem zur Erzielung einer besseren Reproduzierbarkeit der Versuche (Bild 21). Bei Böden mit geringen Wasseraufnahmen über-

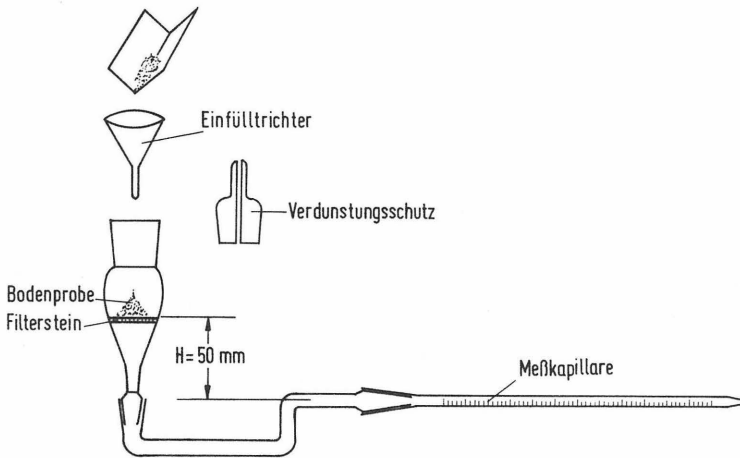


Bild 21: Verbessertes Enslin-Gerät (nach Neff 1959)

wiegt die kapillare Wasseraufnahme gegenüber dem Wasseranlagerungsvermögen der Tonminerale. Die kapillare Wasseraufnahme hängt nach den Untersuchungen von Neff besonders stark von der Höhe und Form des Probenkegels ab. Eine weitere Fehlerquelle war die erforderliche genaue Horizontierung der Meßkapillare. Diese Einflüsse führten zur Anhebung der Filterplatte auf eine Ansaughöhe von $H = 50 \text{ mm}$ gegenüber der Meßkapillare. Gleichzeitig

wurde für Böden mit Wasseraufnahmen bis 150 % die Probenmasse mit $G_t = 1 \text{ g}$ vorgeschrieben.

Später hat Neff (1986) eine Versuchsbeschreibung erstellt, die weitere Details wie die Porosität der Filterplatte und weitere Abmessungen der Apparatur regelt. Damit steht ein Schnellverfahren zur Verfügung, das unter reproduzierbaren Bedingungen angewendet werden kann.

5.3 Bestimmung des Wassergehalts

5.3.1 Genormte Verfahren

Die DIN 18.121, Teil 1 regelt die Bestimmung des Wassergehalts durch Ofentrocknung. Dieses Bestimmungsverfahren wird für alle anderen bodenmechanischen Versuche, bei denen der Wassergehalt ebenfalls zu bestimmen ist (z.B. Proctorversuch, Dichtebestimmung, Zustandsgrenzen), zugrunde gelegt. Der Wassergehalt w einer Bodenprobe ist das Verhältnis der Masse des im Boden vorhandenen Wassers m_w , das bei einer Temperatur von 105°C verdampft, zur Masse m_d der Probe.

Werden die detaillierten Regeln der Norm eingehalten, kann von einer Meßunsicherheit des Ergebnisses von $\Delta w = \pm 0,05 \cdot w$ erreicht werden.

Die Norm fordert eine Trocknung bis zur Gewichtskonstanz. Bei feinkörnigen Böden ist mit einer Trocknungszeit von mindestens 12 Stunden zu rechnen. Die Bestimmung des Wassergehalts mit Schnellverfahren kann deshalb für Güteüberwachungen mineralischer Basisabdichtungen von Bedeutung sein.

In der DIN 18.121, Blatt 2 sind verschiedene Verfahren zur Schnellbestimmung des Wassergehalts genormt:

- Schnelltrocknung
 - durch Infrarotstrahlen
 - Elektroplatte oder Gasbrenner
- Verfahren mit Tauchwägung
- Großpyknometerverfahren
- Calciumcarbidverfahren
- Luftpyknometerverfahren

Die meisten der genannten Verfahren eignen sich aus verschiedenen Gründen nicht für die Güteüberwachung mineralischer Basisabdichtungen. Bei einigen Verfahren ist der erforderliche Aufwand unangemessen hoch (Verfahren mit Tauchwägung, Pyknometerverfahren), bei den meisten ist die Meßunsicherheit zu hoch (Pyknometerverfahren, Calciumcarbidverfahren). Größtenteils sind auch die erforderlichen Probenmengen so groß, daß nicht gewünschte umfangreiche Probenentnahmen aus der fertigen Abdichtung erforderlich sind.

Einzig die Schnelltrocknung mit einem Infrarotstrahler verspricht ausreichende Genauigkeit wegen der der Ofentrocknung ähnlichen Bestimmung bei vertretbarem Aufwand. Die Infrarotstrahlung ist eine langwellige elektromagnetische Wärmestrahlung mit einer Wellenlänge von 780 nm bis 1 mm.

Die Definition des Wassergehaltes entspricht der nach DIN 18.121, Teil 1. Allerdings ist wegen der bei der Infrarottrocknung möglichen höheren Temperaturen der Proben als 105°C damit zu rechnen, daß eine höhere Wassermasse verdampft. Bei feinkörnigen Böden kann dies auf teilweises Verdampfen von Kristallwasser zurückgeführt werden.

5.3.2 Mikrowelle

In Anlehnung an die Infrarottrocknung kommt zur Schnellbestimmung des Wassergehalts eine Trocknung unter Verwendung von Mikrowellen in Frage. Dieses Verfahren ist nicht genormt. Durch die Entwicklung von Mikrowellenherden für den Haushaltsgerätemarkt stehen heute

eine große Zahl preiswerter und sicherer Geräte zur Verfügung, die die Bestimmung des Wassergehalts mit Mikrowellen zusätzlich interessant macht.

Mikrowellen sind Wellen des elektromagnetischen Spektrums (3 mm bis 3 m) zwischen den Ultrakurzwellen (1 mm bis 10 m) und dem infraroten Bereich des optischen Spektrums (780 nm bis 1 mm). Bild 22 gibt einen Überblick über die Wellenlängen, Energien und

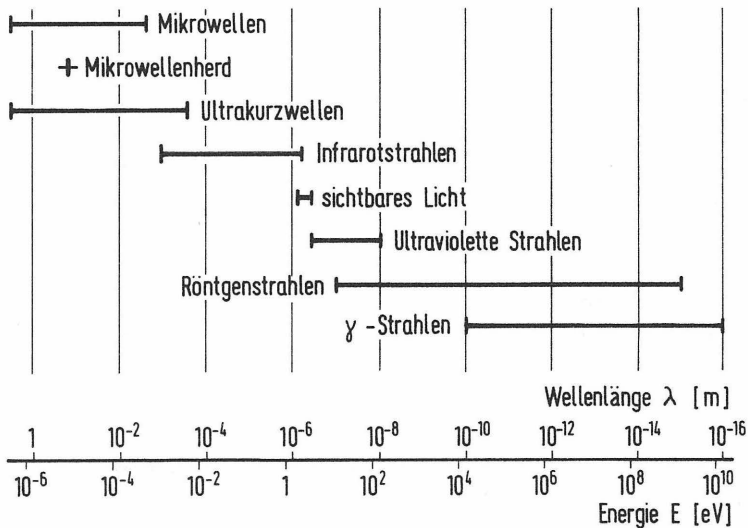


Bild 22: Übersicht über Wellenlängen und Anwendungsgebiete elektromagnetischer Wellen
(nach Jansen, Peuker, Renz 1985)

Anwendungsbereiche elektromagnetischer Wellen (Jansen, Peuker, Renz 1985). Mikrowellen werden von einem kontinuierlich arbeitenden Magnetron erzeugt. Verschiedene Materialien reagieren - ähnlich dem optischen Bereich - unterschiedlich auf die Bestrahlung mit Mikrowellen. Materialien können Mikrowellen

- absorbieren (z.B. Asbest)
- reflektieren (z.B. Metalle)
- passieren lassen (z.B. Polypropylen).

Absorptionseigenschaften des Materials hängen von der Art der Moleküle ab, aus denen das Material besteht. Materialien, die Mikrowellen gut absorbieren, erhitzen schnell. Polare Moleküle, z.B. Wasser, ändern im elektromagnetischen Feld entsprechend der Frequenz der elektromagnetischen Strahlung ständig ihre Ausrichtung. Durch die große intermolekulare Reibung wird schnell eine große Wärmemenge erzeugt. Handelsübliche Mikrowellenherde arbeiten mit einer Frequenz von $2,45 \cdot 10^9$ Hz entsprechend einer Wellenlänge von 12,2 cm.

Das Ansteigen der Temperatur des Materials durch Erhitzen mit Mikrowellen hängt von der spezifischen Wärme und der Dichte des Materials ab. Wasser hat eine größere spezifische Wärme als Boden, aber es absorbiert Mikrowellen viel eher. In feuchten Böden wird das Wasser gegenüber dem Boden bevorzugt erhitzt und schnell in Dampf überführt (Ryley 1969). Die immer zu beobachtende, zum Teil erhebliche Erhitzung des Bodens, aber auch der Probengefäße, ist überwiegend auf die Wärmestrahlung des erhitzten Wassers oder Dampfes zurückzuführen.

Die Bestimmung des Wassergehalts durch Mikrowellen weist einen grundlegenden Unterschied zur Ofentrocknung auf. Durch die Schwingungsanregung der Wassermoleküle findet eine schnelle und gleichmäßige Erhitzung des gesamten Probe im Gegensatz zur langsamen Erwärmung von außen nach innen durch Wärmestrahlung bei Ofentrocknung statt.

Bei einigen Böden ist die Absorption von Mikrowellen mit dem vollständigen Verdampfen des Wassers beendet, bei anderen hält die Erhitzung an. Ryley (1969) berichtet über das Verhalten von 4 ofentrockneten Proben, die anschließend 5 Minuten im Mikrowellenherd behandelt wurden. Dabei zeigte ein Sand keine Temperaturerhöhung, ein Lehm eine Erhöhung um 15°C und zwei Tone eine Erhöhung um 40°C und 80°C. Das unterschiedliche Verhalten wird auf mineralogische Effekte oder auf das Vorhandensein von gebundenem Wasser zurückgeführt.

Die Bedeutung der Mikrowelle für die Bestimmung des Wassergehalts zeigt Bild 23. Ryley (1969) zeigt die Trocknung von jeweils 100 g London clay im konventionellen Trockenofen und im Mikrowellenherd über die Trocknungszeit. Nach 8 Minuten wird bei der Trocknung im Mikrowellenherd die Gewichtskonstanz erreicht, bei Ofentrocknung nach etwa 10 Stunden. Der ermittelte Wassergehalt liegt bei der Mikrowelle mit $w_m = 0,203$ über dem Wassergehalt bei Ofentrocknung mit $w = 0,197$.

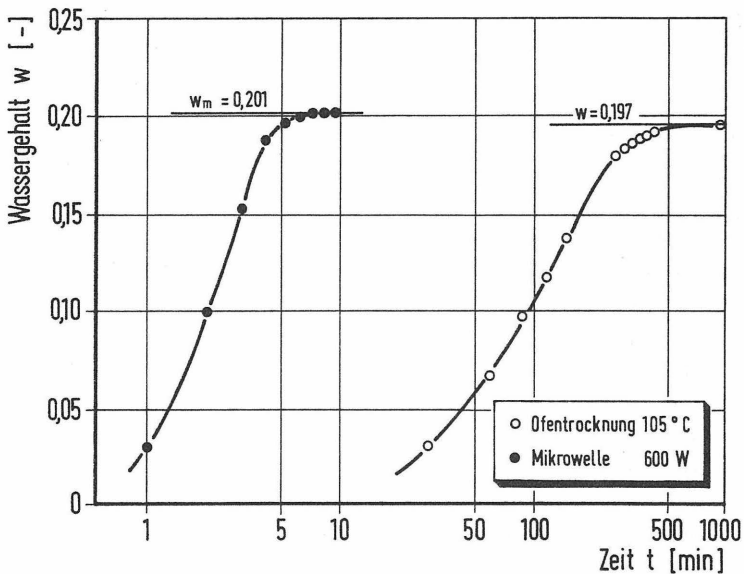


Bild 23: Bestimmung des Wassergehalts durch Ofentrocknung und Mikrowellenherd in Abhängigkeit von der Trocknungszeit (nach Ryley 1969)

5.3.3 Radiometrisches Verfahren

Die Möglichkeit, den Wassergehalt mit radiometrischen Verfahren zu bestimmen, ist länger bekannt. Die älteste Anwendung ist die Tiefensonde, die ähnlich einer Drucksonde in den Boden eingebracht wird und ein Profil des Wassergehalts über die Tiefe liefert (Muhs 1980).

Für die Güteüberwachung mineralischer Basisabdichtungen sind Sonden geeignet, die für die Prüfungen im Erdbau und Asphaltstraßenbau entwickelt wurden. Da diese Sonden gleichzeitig die Feuchtdichte messen, wird dieses Bestimmungsverfahren dort behandelt.

5.4 Bestimmung der Feuchtdichte

5.4.1 Genormte Verfahren

In der DIN 18.125, Blatt 2 sind die Verfahren zur Bestimmung der Dichte im Feld genormt. Alle Verfahren fordern die Bestimmung des Wassergehalts nach DIN 18.121, Teil 1 (Ofentrocknung). Die Verfahren unterscheiden sich damit durch die Art der Volumenbestimmung. Folgende Verfahren werden unterschieden:

- Ausstechzylinder-Verfahren
- Sandersatz-Verfahren
- Ballon-Verfahren
- Flüssigkeitsersatz-Verfahren
- Gipsersatz-Verfahren
- Schürfgruben-Verfahren

Nach DIN 18.125, Teil 2 sind alle Verfahren für die Bestimmung der Dichte der für mineralische Abdichtungen in Frage kommenden feinkörnigen Böden geeignet. Als Schnellverfahren sind sie jedoch alle nicht anzusprechen, da die erforderliche Versuchszeit durch die für die Wassergehaltsbestimmung erforderliche Zeit geprägt ist.

Darüber hinaus sollte ein zur intensiven Güteüberwachung mineralischer Abdichtungen geeignetes Verfahren möglichst zerstörungsfrei arbeiten. Das die Anforderungen aller bisherigen Vorschriften, Regeln und Empfehlungen voll erfüllende Ausstechzylinder-Verfahren erfordert dabei noch das kleinste Probenvolumen.

Genormte Verfahren kommen deshalb als Schnellverfahren nicht in Betracht. Für die in jedem Fall erforderliche Gewinnung von Sonderproben zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwerts muß ohnehin auf das Ausstechzylinder-Verfahren der DIN 18.125, Teil 2 zurückgegriffen werden.

5.4.2 Radiometrisches Verfahren

5.4.2.1 Allgemeines

Seit etwa vier Jahrzehnten sind radiometrische Meßverfahren für verschiedene Bereiche des Bauingenieurwesens - vornehmlich in den USA - entwickelt worden (Belcher et al. 1952). In den USA ist dieses Meßverfahren weit verbreitet. Seit etwa zwei Jahrzehnten werden in verschiedenen Bundesstaaten der USA die bituminösen Deckenarbeiten nach dem radiometrischen Verfahren abgenommen. In der Bundesrepublik Deutschland liegen zum Einsatz des radiometrischen Verfahrens im Erdbau (N.N. 1975a) und im bituminösen Straßenbau (N.N. 1984) neben zahlreichen wissenschaftlichen Untersuchungen Arbeitsanleitungen und vorläufige Merkblätter vor.

Zumindest bei Güteüberwachungen im Erdbau hat das radiometrische Meßverfahren bisher keine große Bedeutung erlangt. Dies mag zum einen an den relativ hohen Investitions- und Betriebskosten liegen. Zum anderen kommen Unkenntnis über Genauigkeit und Reproduzierbarkeit des Verfahrens hinzu.

Bei radiometrischen Verfahren wird die Intensität radioaktiver Strahlungen gemessen und bei bestimmter Versuchsanordnung in Beziehung zur Dichte und zum Wassergehalt des durchstrahlten Stoffs gesetzt. Dazu werden Sonden verwendet, für die häufig auch die Bezeichnung

"Isotopensonde" verwendet wird. Die für die Baumeßtechnik entwickelten Sonden verwenden Gamma- und Neutronenstrahlung.

5.4.2.2 Physikalische Grundlagen

Die für radiometrische Meßverfahren in Frage kommende Strahlung ist so energiereich, daß sie beim Auftreffen auf Materie Elektronen aus den Atomhüllen herausschlagen kann. Die ursprünglich elektrisch neutralen Atome werden dadurch zu Ionen, Trägern elektrischer Ladung. Diese Art der Strahlung wird deshalb auch ionisierende Strahlung genannt. Von den elektromagnetischen Wellen sind nur die äußerst kurzwelligen, energiereichen Röntgen- und Gamma-Strahlen (Bild 22) in der Lage, beim Durchgang Materie zu ionisieren. Röntgen- und Gamma-Strahlen sind in vielen Erscheinungen der Teilchenstrahlung ähnlich. Sie werden deshalb auch häufig unter dem Begriff "Photonenstrahlung" zusammengefaßt (Jansen, Peuker, Renz 1985).

Eine Atomhülle besteht aus mehreren Schalen. Beim elektrisch neutralen Atom ist die Anzahl der den Atomkern umgebenden negativ geladenen Elektronen auf den Schalen gleich der Zahl der im Atomkern enthaltenen Protonen. Eine Änderung der Bahnbewegung eines Elektrons bedeutet einen "Sprung" auf eine andere Schale, was mit einer Energieänderung verbunden ist. Wird bei einem solchen "Bahnübergang" Energie gewonnen, wird sie in Form elektromagnetischer Strahlung frei. Ein solches Energiepaket wird "Strahlungsquant" oder "Photon" genannt (Bild 24). Ein Atom kann zur Abstrahlung eines Photons veranlaßt werden, wenn ihm Energie zugeführt wird. Dabei wird die zugeführte Energie zunächst benötigt, um das Elektron auf die äußere Bahn zu befördern. Beim Rücksprung auf die energieärmere innere Bahn wird die Energie in Form von Strahlung frei.

Radioaktivität ist die Eigenschaft von Isotopen, unter Aussendung von Teilchenstrahlung (α -Strahlung aus positiv geladenen Helium-Kernen und β -Strahlung aus Elektronen) oder elektromagnetischer Wellen (γ -Strahlung) in Isotope anderer Elemente zu zerfallen. Natürliche radioaktive Stoffe sind zum Beispiel Isotope der Elemente Kohlenstoff, Kalium, Radium und

Uran. Künstliche radioaktive Stoffe entstehen durch Beschuß bestimmter Elemente mit Helium-Kernen, Neutronen, Wasserstoff-Kernen oder τ -Strahlen.

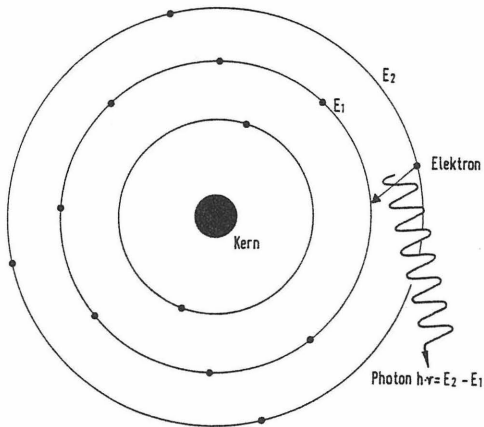


Bild 24: Entstehung elektromagnetischer Strahlung in der Atomhülle (nach Jansen, Peuker, Renz 1985)

5.4.2.3 Messung der Feuchtdichte

Für die Bestimmung der Feuchtdichte nach dem radiometrischen Verfahren wird in der Regel das künstliche radioaktive Isotop Cäsium 137 ($\text{Cs } 137$) verwendet. Cäsium 137 sendet beim Zerfall Photonen in Form von γ -Strahlen aus. Beim Auftreffen auf die zu prüfende Materie werden vier Prozesse unterschieden (Jansen, Peuker, Renz 1985):

- Photo-Effekt
- Compton-Effekt
- Paarbildungs-Effekt
- Kernphoto-Effekt

Bild 25 zeigt schematisch die drei erstgenannten Effekte. Beim Photoeffekt wird das Photon durch ein Atom absorbiert, wobei die gesamte Energie auf ein Elektron übertragen wird. Dieser Effekt tritt vor allem bei niedrigen Energien unter 0,1 MeV auf.

Bei Photonen mit hohen Energien über 10 MeV, wie sie in Beschleunigern erzeugt wird, ist der Kernphotoeffekt zu berücksichtigen. Dabei werden ein oder mehrere Nukleonen aus dem Atomkern herausgestoßen.

Beim Comptoneffekt stößt das Photon auf ein äußeres Elektron der Atomhülle. Beim Stoßvorgang wird ein Teil der Energie des Photons auf das Elektron übertragen. Die übertragene Energie reicht aus, um das Elektron aus der Bindung an das Atom zu lösen. Das Photon fliegt mit verminderter Energie in anderer Richtung davon, es wird also nicht wie beim Photoeffekt eingefangen, sondern gestreut. Der Comptoneffekt ist vor allem im Energiebereich von 0,1 MeV bis 5 MeV von Bedeutung.

Zur sogenannten Paarbildung kann eine Absorption der Strahlung führen, wenn die Energie der einfallenden Photonen größer als 1,022 MeV ist. Diese Energie entspricht genau der Masse eines Elektron-Positron-Paares. Das Photon wird vernichtet. Die Paarbildung ist beispielhaft für die Umwandlung von Energie in Materie.

Für das radiometrische Meßverfahren ist bei Verwendung des Isotops Cs 137 mit einer Primärenergie von 0,662 MeV der Compton-Effekt von überragender Bedeutung. Elektromagnetische Strahlung wird über die Wechselwirkungsprozesse nachgewiesen, da nur Teilchenstrahlung (α - und β -Strahlung) direkt nachgewiesen werden können. Zum Messen der ionisierenden Strahlen werden beim radiometrischen Meßverfahren üblicherweise Zählrohre verwendet. Eine Beschreibung der Nachweismethoden findet sich bei Jansen, Peuker und Renz (1985).

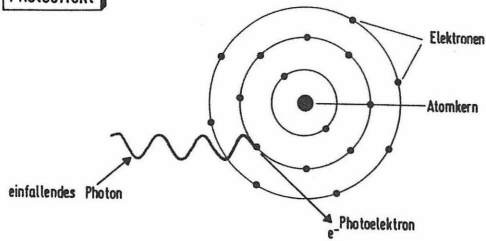
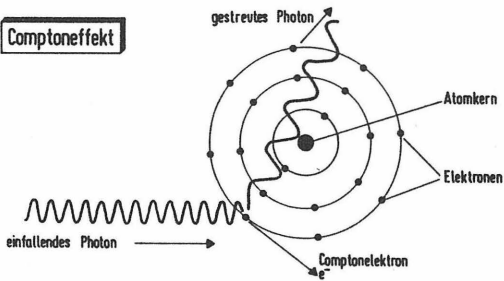
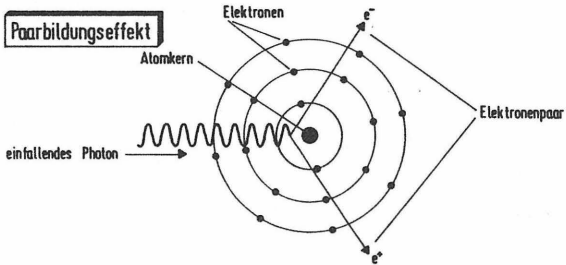
Photoeffekt**Comptoneffekt****Paarbildungseffekt**

Bild 25: Schematische Darstellung der Wechselwirkungen zwischen γ -Strahlung und Materie (nach Jansen, Peuker, Renz 1985)

5.4.2.4 Messung des Wassergehalts

Neutronen sind elektrisch neutrale Bausteine der Atomkerne und haben die Masse 1. Wegen ihrer elektrischen Neutralität werden sie durch die elektrischen Felder des Atoms nicht beeinflusst und besitzen daher eine hohe Durchdringungsfähigkeit (N.N. 1984). Nur wenn Neutronen direkt auf einen Atomkern treffen, treten die Wechselwirkungen

- elastische Streuung
- Einfangung von Neutronen

auf.

Beim Auftreffen auf schwere Atomkerne wird ein Neutron wie beim elastischen Stoß ohne nennenswerte Energieabgabe abprallen. Beim leichten Wasserstoff-Atomkern überträgt das Neutron einen erheblichen Teil seiner Energie und wird dadurch langsamer. Bild 26 zeigt schematisch diese Neutronenmoderation beim Zusammenstoß mit einem schweren und einem leichten Atomkern. Beim Zusammenstoß mit einem leichten Atomkern gelangen die Neutronen in ein thermisches Gleichgewicht mit den Atomen der Umgebung. Bei weiteren Stößen wird Energie aufgenommen und abgegeben, so daß im Mittel weder die Neutronen an die Kerne noch die Kerne an die Neutronen Energie übertragen können. Dieser Vorgang findet fast ausschließlich mit Wasserstoffkernen statt, da außer diesen keine ähnlich leichten Atomkerne vorhanden sind.

Die Dichte der Neutronen in diesem Gleichgewichtszustand ist damit ein direktes Maß für die Wasserstoffkonzentration in der durchstrahlten Materie. Die abgebremsten, sogenannten thermischen Neutronen werden analog den τ -Strahlen nachgewiesen.

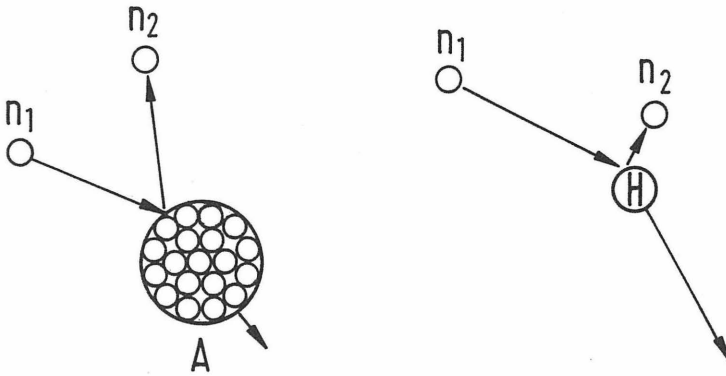


Bild 26: Verhalten von Neutronen beim Zusammenstoß mit einem schweren und einem leichten Atomkern

Der zweite genannte Effekt der Wechselwirkung zwischen Neutronenstrahlung und Materie ist das Einfangen von niederenergetischen Neutronen beim Auftreffen auf Atomkerne. Dieser Vorgang kann unter bestimmten Voraussetzungen das Meßergebnis beeinflussen. Der Atomkern besitzt nach diesem Vorgang einen hohen Energieüberschuß, den er in Form von Strahlungsquanten wieder abgibt. Der Atomkern ist radioaktiv geworden. Dieser Effekt ist vielfach untersucht (N.N. 1984). Es wurde festgestellt, daß besonders die Elemente Kadmium, Bor und Chlor gern langsame Neutronen einfangen.

5.4.2.5 Konstruktion von radiometrischen Sonden

Für die Bestimmung von Dichte und Wassergehalt nach dem radiometrischen Verfahren sind zahlreiche Sondentypen entwickelt worden. Aus Dicke und Tiefenlage der zu untersuchenden Bodenschicht haben sich drei Grundtypen herausgebildet:

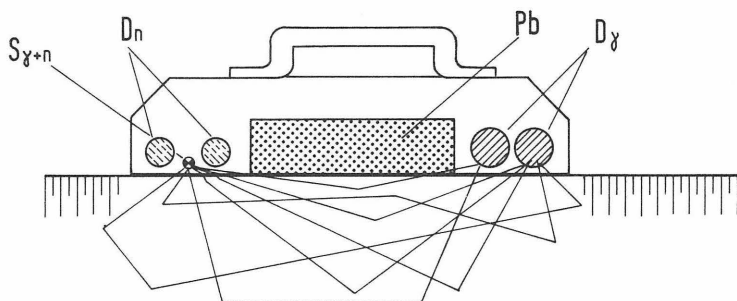
- oberflächennaher Bereich (wenige cm)
- Schicht von der Oberfläche bis in 30-60 cm Tiefe
- tiefere Schichten bis etwa 20 m

Im folgenden werden nur Entwicklungen vorgestellt, die für die Güteüberwachung mineralischer Deponiebasisabdichtungen von Bedeutung sind. Dabei handelt es sich um von der Oberfläche arbeitende Geräte.

Eine Entwicklung aus dem Asphaltstraßenbau ist die Oberflächensonde, meist auch als Aufsetzsonde bezeichnet (Bild 27). Erste systematische Untersuchungen zur Wirkungsweise dieser Sonden stammen von Belcher et al. (1952). Die dargestellte Sonde enthält einen kombinierten Gamma- und Neutronenstrahler $S_{\gamma+n}$ sowie entsprechende Strahlungsdetektoren D_{γ} und D_n . Der Bleiblock Pb dient zur Abschirmung der Gamma-Direktstrahlung.

Aufsetzsonden arbeiten für die Dichtemessung nach dem sogenannten Rückstrahlverfahren. Da den Gamma-Strahlen der direkte Weg zum Detektor (Zählrohr) durch die Bleiabschirmung versperrt ist, zählt der Detektor die aus der Materie "rückgestrahlten" Photonen. Mit dem Rückstrahlverfahren werden die oberflächennahen Bodenschichten bis in etwa 5-10 cm Tiefe erfaßt.

Halbkugelförmig um die Neutronenquelle stellt sich das Gleichgewicht zwischen den thermischen (abgebremsten) Neutronen und den Wasserstoff-Atomkernen ein. Der Neutronendetektor zählt die Dichte der thermischen Neutronen im unmittelbaren Umfeld des Strahlers. Je nach Wassergehalt reicht die Wirkungstiefe etwa 15-30 cm.



$S_{\gamma+n}$ Gamma-Neutronen-Strahlenquelle
 D_n Detektor für langsame Neutronen
 D_{γ} Detektor für Gamma-Strahlung
 Pb Bleiabschirmung

Bild 27: Konstruktion einer Oberflächen- oder Aufsetzsonde (nach N.N. 1975a)

Bei den Einstichsonden wird ein radioaktiver Strahler an der Spitze einer Stange bis in eine bestimmte Tiefe in den Boden eingebracht. Der Strahlungsdetektor verbleibt an der Oberfläche. Die Detektoren sind je nach Bauart der Sonde symmetrisch oder unsymmetrisch zum Strahler angebracht (Bild 28). Es sind bestimmte, bei der Kalibrierung der Sonde festgelegte Einstichtiefen einzuhalten.

Der Detektor zählt die Photonen, die vom Strahler durch die Materie gelangen. Diese Meßverfahren wird deshalb auch Durchstrahlungsmethode genannt. Das Verfahren ist nur für die mit Gamma-Strahlung gemessene Dichte anwendbar, weil der Detektor für die Neutronenstrahlung aus den genannten physikalischen Gründen in unmittelbarer Nähe der Quelle platziert sein muß. Die gemeinsame Anordnung von Gammaquelle, Neutronenquelle und Neutronen-

detektor in der Strahlerstange ist aus räumlichen Gründen nicht zu verwirklichen. Deshalb wird bei Einstichsonden entweder nur die Dichte gemessen oder Neutronenquelle und Neutronendetektor sind wie bei den Aufsetzsonden angeordnet (Bild 27).

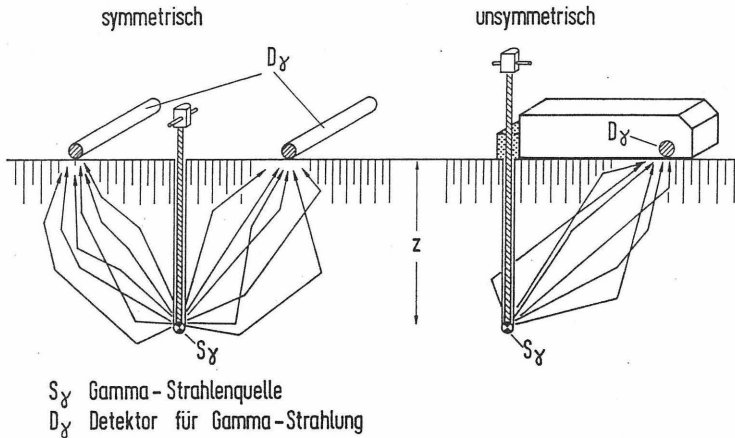
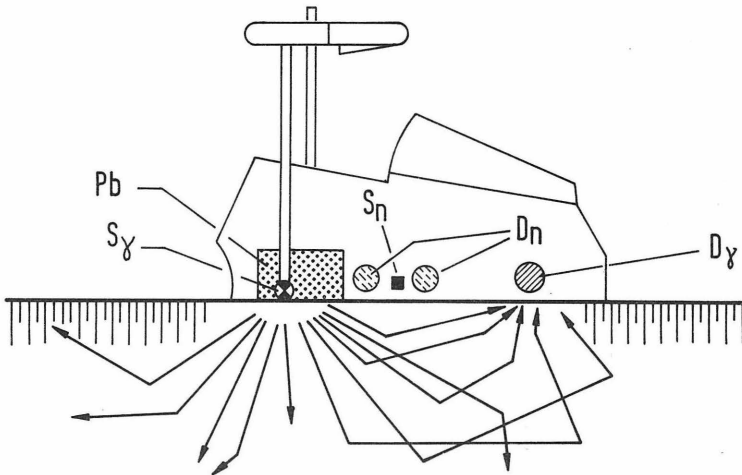


Bild 28: Symmetrische und unsymmetrische Einstichsonden (nach Behr 1972)

In Deutschland handelsübliche Einstichsonden erreichen Einstichtiefen bis 30 cm. Sie sind damit für die Güteüberwachung mineralischer Basisabdichtungen geeignet.

Üblicherweise sind Einstichsonden so konstruiert, daß sie gleichzeitig als Aufsetzsonden verwendet werden können. Ebenso enthalten sie gleichzeitig einen Gamma-Strahler an der Strahlerstange und einen Neutronenstrahler an der Oberfläche, so daß mit der gleichen Sonde in einem Arbeitsgang Feuchtdichte und Wassergehalt bestimmt werden können. Bild 29 zeigt die Konstruktion der in Deutschland gebräuchlichsten Sonde.



- S_γ Gamma - Strahlenquelle
- S_n Neutronen - Strahlenquelle
- D_n Detektor für langsame Neutronen
- D_γ Detektor für Gamma - Strahlung
- Pb Bleiabschirmung

Bild 29: Kombinierte Aufsetz- und Einstichsonde mit Gamma- und Neutronenstrahler

5.4.2.6 Genauigkeit und Reproduzierbarkeit

Die von der Gamma-Strahlenquelle ausgesandten Strahlungsquanten werden von der zu prüfenden Materie gestreut und gelangen dadurch nur teilweise zum Zählrohr. Den generellen Zusammenhang zwischen der zu messenden Zählrate und der Dichte der zu prüfenden Materie zeigt Bild 30.

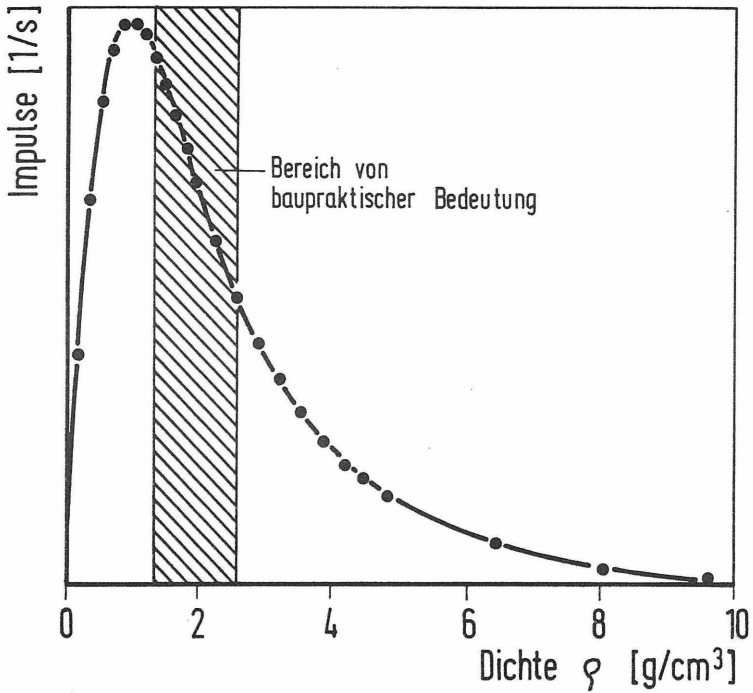


Bild 30: Zusammenhang zwischen Zählrate und Dichte bei Gamma-Strahlung (nach Tankut 1964)

Bei der theoretischen Dichte von $\rho = 0$ ist die Zählrate ebenfalls 0, weil die von der Strahlenquelle ausgesandten Quanten nicht von Materie gestreut werden und die Direktstrahlung abgeschirmt ist (siehe Bild 27). Zunächst ist ein starker Anstieg der Zählrate mit steigender Dichte zu beobachten, der auf den Anstieg der Streuvorgänge bei steigender Materialdichte

zurückzuführen ist. Mit weiter steigender Dichte nimmt die Absorption der ausgesandten Strahlungsquanten zu, so daß dieser Effekt den erstgenannten überlagert.

Für die Anwendung des radiometrischen Verfahrens bei Güteüberwachungen im Erdbau ist nur der Bereich zwischen $\rho = 1,0 \text{ g/cm}^3$ und $\rho = 2,4 \text{ g/cm}^3$ von Bedeutung. In diesem Bereich hat die Kurve einen nahezu linearen Verlauf.

Der radioaktive Zerfall und mit ihm die Aussendung von Strahlungsquanten ist den Gesetzen der Statistik unterworfen. Dies bedeutet, daß unter absolut konstanten Verhältnissen ermittelte Zählraten voneinander verschieden sind, aber um einen Mittelwert schwanken. Dieser Einfluß bestimmt die Meßdauer, über die die Zählrate ermittelt wird. Lorenz (1954) berichtet über zwei Meßreihen, bei denen eine Meßdauer von 1 min und 3 min gewählt wurde. Dabei zeigte sich, daß die Meßzeit von 1 min eine Standardabweichung der Zählrate von 1 % ermöglicht, Meßzeiten von 3 min hingegen eine Standardabweichung von 0,6 % (Bild 31). Tankut (1964) gibt den Fehler aus der statistischen Verteilung des radioaktiven Zerfalls mit

$$f = \pm \frac{1}{\sqrt{\mu}}$$

mit f = Fehler
 μ = Mittelwert der gezählten Impulse

Die Aktivität N des radioaktiven Zerfallsprozesses nimmt im Laufe der Zeit t nach dem Zerfallsgesetz ab

$$N = N_0 \cdot e^{-\frac{0,693 \cdot t}{T_{1/2}}}$$

mit N = Aktivität [1/s]
 N_0 = Anfangsaktivität [1/s]
 $T_{1/2}$ = Halbwertszeit [a]
 t = Zeit [a]

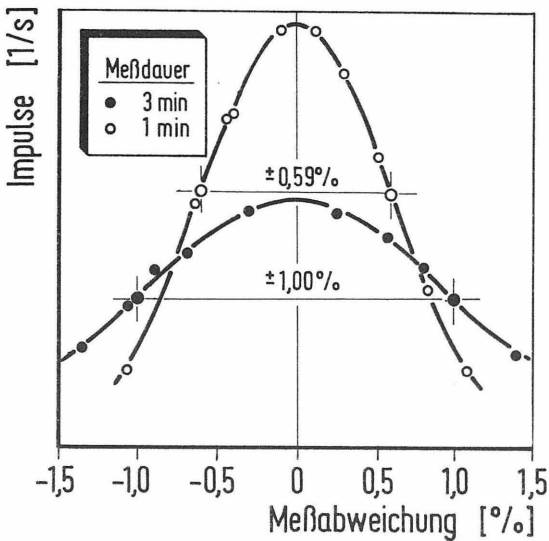


Bild 31: Reproduzierbarkeit der Zählrate unter konstanten Bedingungen für zwei Meßzeiten (nach Lorenz 1954)

Wird angenommen, daß radiometrische Sonden mit der Strahlenquelle Cäsium 137 ($\text{Cs } 137$) mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2} = 30,2 \text{ a}$ verwendet werden, sinkt die Aktivität z.B. in einem Jahr bei einer Anfangsaktivität von $N_0 = 2,96 \cdot 10^8 \text{ [1/s]}$ auf $N = 2,89 \cdot 10^8 \text{ [1/s]}$. Dies entspricht einer Abweichung um 2,3 % des Anfangswertes, woraus sich die Forderung nach jährlicher Kalibrierung ergibt.

Bei der Verwendung von Aufsetzsonden ist die Verteilung der Dichte über die Tiefe von besonderer Bedeutung, da die oberen Bodenschichten bei diesen Sonden naturgemäß einen großen Einfluß haben. Hierzu hat Behr (1965) Untersuchungen durchgeführt, die mit sogenannten Einflußgewichten arbeiten. Die Meßanordnung besteht aus einem würfelförmigen, plangeschliffenen Naturstein mit 1 m Kantenlänge (Dichte $\rho = 2,15 \text{ g/cm}^3$) und aus einem

Satz plangeschliffener Glasplatten von je 1 cm Stärke der Dichte $\rho = 2,52 \text{ g/cm}^3$. Der mit der Aufsetzsonde gemessene Raumgewichtsmittelwert konnte durch Veränderung der Zahl der Glasplatten vom reinen Raumgewicht der Unterlage bis zum reinen Raumgewicht der Glasplatten variiert werden. Die sich daraus ergebenden Einflußgewichte der zentimeterdicken Schichten zeigt Bild 32 beispielhaft für zwei untersuchte Sonden. Die Unterschiede beider untersuchter Sonden liegen dabei vor allem in den geometrischen Randbedingungen wie dem Abstand Strahler-Detektor sowie dem durch Bleiabschirmung offengelassenen Abstrahlwinkel. Dabei wird deutlich, daß die Tiefenwirkung der Aufsetzsonden selbst bei optimierten geometrischen Randbedingungen gering ist. Im wesentlichen werden nur die obersten Zentimeter der zu prüfenden Materie erfaßt.

Aus der Praxis der Prüfung mit Aufsetzsonden im Asphaltstraßenbau ist der Einfluß der Rauigkeit der Oberfläche auf das Meßergebnis bekannt. Kleinste Luftspalte zwischen dem

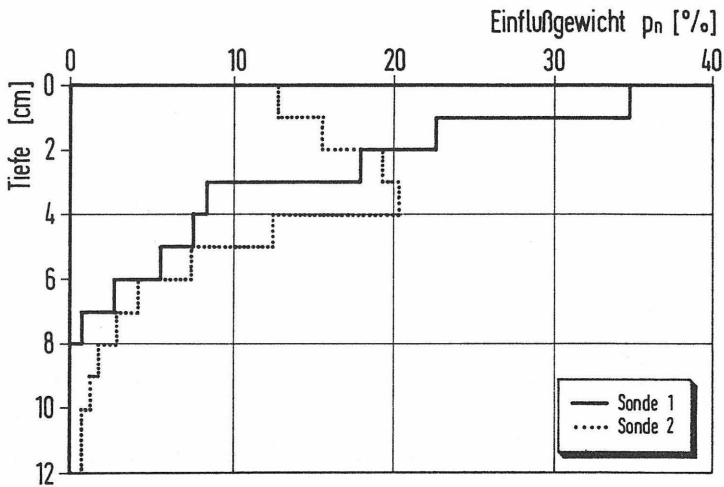


Bild 32: Einflußgewichte von zwei Aufsetzsonden für die Tiefenwirkung (nach Behr 1965)

Sondenboden und der Oberfläche des zu prüfenden Materials ermöglichen den direkten Durchgang von Strahlungsquanten zum Detektor, erhöhen die Zählrate und führen zu einer Verringerung des Meßwertes. Bild 33 (nach Behr 1966) zeigt die Verringerung der gemessenen Dichte in Abhängigkeit eines zusätzlichen Hohlraums im oberen Zentimeter für die beiden schon in Bild 32 verglichenen Sonden. Dabei wird deutlich, daß die Sonde 2 mit der größeren Tiefenwirkung auch den kleineren Fehler durch die raue Oberfläche aufweist.

Versuche, den Einfluß aus der Rauigkeit der Oberfläche auszuschalten, wurden durch die Entwicklung des sogenannten Luftspaltverfahrens gemacht. Dabei wurde die Sonde mit einem definierten Luftspalt, in der Regel von 1 cm Stärke, auf die zu prüfende Oberfläche aufgesetzt. Die Unregelmäßigkeiten sollten gegenüber dem planmäßigen Luftspalt vernachlässigbar werden. Es zeigte sich jedoch, daß der Einfluß der nicht mehr abzuschirmenden Direktstrahlung

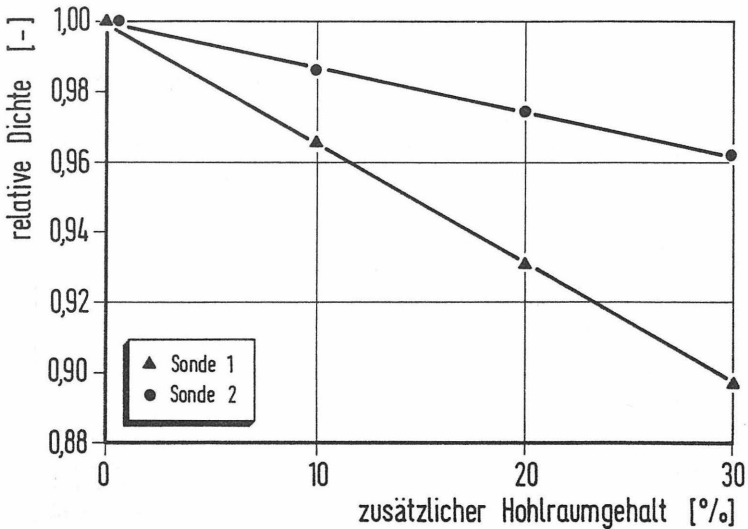


Bild 33: Verringerung der gemessenen Dichte durch die Rauigkeit der Oberfläche (nach Behr 1966)

durch den Luftspalt so dominierend wurde, daß der Einfluß des zu prüfenden Materials für eine ausreichende Meßgenauigkeit nicht mehr groß genug war.

Zahlreiche Autoren berichten über Untersuchungen zur Beeinflussung der Dichtebestimmung durch das radiometrische Verfahren auf Grund der unterschiedlichen mineralogisch-chemischen Zusammensetzung des zu prüfenden Bodens. In Bild 34 sind einige Korrekturfaktoren zusammengestellt, die Behr (1983a) für verschiedene Gesteine festgestellt hat. Die Korrekturwerte beziehen sich auf eine Sondenkalibrierung an den üblichen Kalibriermaterialien Aluminium und Magnesium.

Bei sorgfältiger Ausführung der Messungen sind jedoch Gesamtfehler zu erwarten, die verglichen mit konventionellen Verfahren in gleicher Größenordnung liegen. Wieden, Pippich und Hintsteiner (1975) veröffentlichten das Ergebnis einer Vergleichsmessung an 135 Meßpunkten zwischen einer radiometrischen Aufsetzsonde und der Dichtebestimmung durch Tauchwä-

Material	Korrekturfaktor
Aluminium	1,0000
Rheinkies	0,9813
Löß	0,9776
Ton	0,9793
Kalkstein	0,9822
Grauwacke	0,9979
Basalt	1,0323
Wasser	0,8692
Bitumen	0,8796

Bild 34: Korrekturfaktoren für mineralogisch-chemischen Einflüsse auf die Dichtebestimmung nach dem radiometrischen Verfahren (nach Behr 1983a)

gung nach DIN 1996, Teil 7 an Asphaltdeckschichten (Bild 35). Dabei ist zu erkennen, daß 95 % aller Werte (doppelte Standardabweichung) Meßabweichungen von $\leq \pm 2,1$ % bedeuten. Die mittlere Meßabweichung beträgt dabei nur 0,18 %.

Wesentlichen Einfluß auf die Genauigkeit des radiometrischen Verfahrens bei der Wassergehaltsbestimmung hat die chemische Zusammensetzung des Wassers. Zunächst muß beachtet werden, daß Wasser im Boden nicht nur als freies Wasser vorhanden sein kann. Insbesondere tonige Böden, die als mineralische Deponiebasisabdichtung geeignet sind, enthalten zum Teil nennenswerte Anteile kristallin gebundenen Wassers. Darüber hinaus haben viele im Wasser gelöste Ionen die Eigenschaft, langsame thermische Neutronen zu absorbieren. Bild 36 zeigt eine Übersicht über die Absorptionsfaktoren dieser Neutronen nach N.N. (1985). Dabei sind die Elemente nach steigenden Faktoren sortiert.

Es zeigt sich, daß insbesondere die Absorptionseigenschaften der Elemente Stickstoff, Eisen, Uran, Titan, Mangan, Chlorid, Bor und Kadmium so groß sind, daß sie beachtet werden müssen. Von diesen sind allerdings in üblichen Böden sowie im Porenwasser die Elemente Eisen,

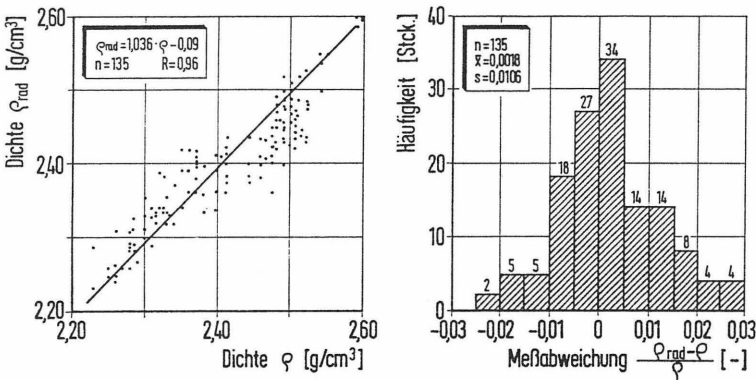


Bild 35: Vergleich der Dichte nach dem radiometrischen Verfahren mit dem Tauchwägungsverfahren (nach Wieden, Pippich und Hintsteiner 1975)

Chlorid und wegen der besonders hohen Absorption Kadmium von praktischer Bedeutung. Ist mit diesen Elementen zu rechnen, sind nach N.N. (1985) besondere Eichmaßnahmen erforderlich.

Element		Absorptionsfaktor
Sauerstoff	O	0,0002
Kohlenstoff	C	0,0034
Magnesium	Mg	0,063
Silizium	Si	0,16
Blei	Pb	0,17
Phosphor	P	0,19
Aluminium	Al	0,23
Wasserstoff	H	0,33
Kalzium	Ca	0,43
Schwefel	S	0,51
Natrium	Na	0,53
Stickstoff	N	1,90
Eisen	Fe	2,53
Uran	U	4,20
Titan	Ti	6,10
Mangan	Mn	13,30
Chlorid	Cl	33,0
Bor	B	750,0
Kadmium	Cd	2390,0

Bild 36: Absorptionsfaktoren thermischer Neutronen für verschiedene Elemente (nach N.N. 1985)

Behr (1972) macht den Versuch, die einzelnen möglichen Fehlerquellen bei der Verwendung von radiometrischen Sonden zu quantifizieren und daraus einen Gesamtfehler anzugeben. Bild 37 zeigt die Zusammenstellung von Behr. Dabei muß berücksichtigt werden, daß Behr offensichtlich von der Aufgabe ausgeht, einen Absolutwert der Dichte messen zu wollen. Aus dem Text geht hervor, daß der Begriff "Fehler" als die einfache Standardabweichung der

Meßwerte definiert ist. Dabei wird vorausgesetzt, daß Behr alle wesentlichen Fehlermöglichkeiten erfaßt hat.

Ursache der Fehler	Aufsetz- sonde [%]	Einstich- sonde [%]
Schwankung der radioaktiven Strahlung	0,5	0,2
Instabilität der Geräte	0,5	0,5
Fehler der Kalibrierkurve	1,2	1,0
Störung des Bodens durch Einstich	-	1,0
Stababweichung ± 5 mm zum Detektor	-	1,0
Abweichung der Einstichtiefe ± 1 mm	-	0,1
Fehler der Wassergehaltsmessung	1,0	1,0
Relativer mittlerer Gesamtfehler	1,5	2,0

Bild 37: Überblick über einzelne Fehlerquellen und Abschätzung des möglichen Gesamtfehlers radiometrischer Sonden (nach Behr 1972)

5.5 Einmischen von Bentonit

Bentonit wird gemahlen und getrocknet und in der Regel in Silos auf die Baustelle geliefert. Die erforderliche Zugabemenge ergibt sich aus der Eignungsprüfung. Die je Einbauschicht erforderliche Bentonitmenge wird durch ein Streufahrzeug verteilt. Aufgabe der Güteüberwachung ist:

- Kontrolle der Bentonitmenge
- Kontrolle der homogenen Verteilung.

Für die Kontrolle der Bentonitmenge sind einfache Möglichkeiten vorhanden. Neben der Kontrolle der Gesamtmenge für einen definierten Bauabschnitt kann die Bentonitmenge

durch das Auswiegen des Bentonits, der auf ein unter das Streufahrzeug gelegtes Blech (etwa $0,25 \text{ m}^2$) fällt, bestimmt werden.

Für die homogene Verteilung des Bentonits sind keine reproduzierbaren Verfahren gebräuchlich. Auch visuell ist der Bentonit nach dem ersten Fräsgang nicht mehr zu erkennen.

In der Giesserei-Technik stellt sich häufig das Problem, bei der Wiederaufarbeitung von Formsanden die zum Binden eingebrachte Bentonitmenge zu überprüfen. Für diese Aufgabenstellung wurde das sogenannte Methylenblau-Verfahren (N.N. 1975b) entwickelt. Dabei wird die Eigenschaft des Bentonits, den Farbstoff Methylenblau zu absorbieren, genutzt. Von einer Referenzprobe des bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrockneten Bentonits werden 5 abgestufte Mengen zwischen 0,2 g und 0,7 g auf 0,001 g genau gewogen. Mit jeweils 25 ml destillierten Wassers und 5 ml gesättigter Tetranatrium-Diphosphat-Lösung wird je eine Bentonitsuspension hergestellt. Die Suspension wird eingedampft. Nach dem Abkühlen wird der Rückstand mit einigen Glaskugeln und 100 ml Methylenblau-Stammlösung geschüttelt. Anschließend wird über einen Membranfilter filtriert und das Filtrat mit destilliertem Wasser verdünnt. Von dieser Lösung wird die Lichtdurchlässigkeit im Photometer bei einer Wellenlänge im Bereich von 370 bis 470 nm gegen destilliertes Wasser gemessen. Mit den gemessenen Lichtdurchlässigkeiten der 5 abgestuften Mengen wird eine Eichkurve aufgestellt (Bild 38).

Eine Menge von etwa 5 g des Formstoffes je nach erwartetem Bentonitgehalt wird zur Bestimmung des Bentonitgehalts im Formsand dem gleichen Verfahren unterzogen. Aus dem Vergleich der ermittelten Lichtdurchlässigkeit mit der Eichkurve des Referenzbentonits kann die Bentonitmenge im Formsand errechnet werden.

Für das Gebiet der Formsande ist dieses Verfahren erprobt, ausreichend genau und reproduzierbar. Für den Einsatz des Verfahrens bei der Güteüberwachung mineralischer Basisabdichtungen ergibt sich gegenüber den Formsanden eine wesentliche Abweichung. Der Formsand - in der Regel reiner Quarzsand definierter Körnung - weist keine eigenen Absorptionseigenschaften auf. Abdichtungsmaterial enthält jedoch, auch wenn es mit Bentonit verbessert werden muß, Tonminerale, die eigene Absorptionseigenschaften aufweisen.

Untersuchungen, ob das Methylenblau-Verfahren auch unter diesen Bedingungen zum Nachweis des in Grundmaterial eingemischten Bentonits geeignet ist, liegen nicht vor.

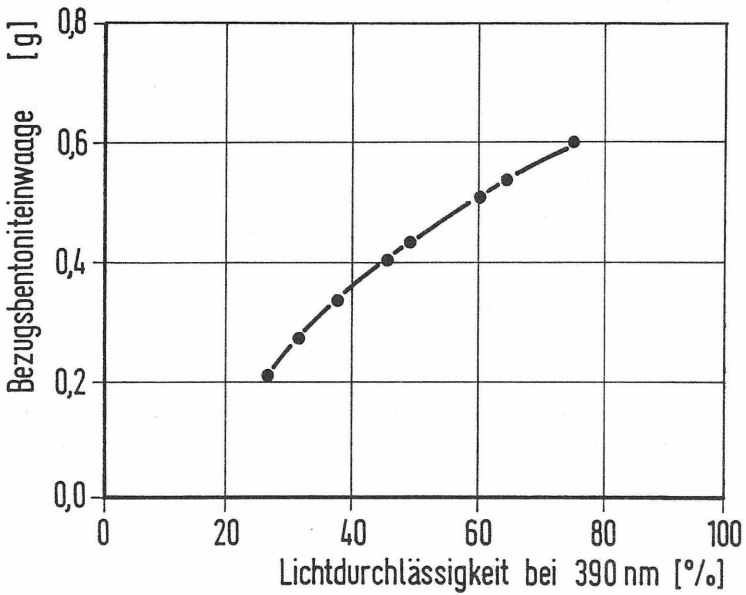


Bild 38: Eichkurve der Lichtdurchlässigkeit für einen Referenzbentonit (N.N. 1975b)

6. EIGENE UNTERSUCHUNGEN

6.1 Allgemeines

In den folgenden Abschnitten der Arbeit werden für die ausgewählten Prüfverfahren

- Bestimmung des Wasserbindevermögens w_b
- Bestimmung des Wassergehalts im Mikrowellenherd w_m
- Bestimmung des Wassergehalts mit dem radiometrischen Verfahren w_{rad}
- Bestimmung der Feuchtdichte mit dem radiometrischen Verfahren ρ_{rad}
- Bestimmung der Menge und homogenen Verteilung zugemischten Bentonits

Untersuchungen zur Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Verfahren unter den für die Prüfung mineralischer Deponiebasisabdichtungen wichtigen Randbedingungen vorgestellt. Dafür werden auch die Anforderungen an die Genauigkeit des Prüfverfahrens definiert. Je nach Art des Prüfverfahrens werden diese Untersuchungen im Labor, im Feld oder an besonders hergestellten Prüffeldern ausgeführt.

Diese Untersuchungen werden jeweils mit der Erarbeitung einer detaillierten Versuchsbeschreibung abgeschlossen.

Auf zwei Baustellen wird anschließend im Rahmen der Eigenüberwachung die Herstellung des mineralischen Teils einer Deponiebasisabdichtung überprüft. Dabei kommen die entwickelten Schnellverfahren neben den üblichen, in der Regel genormten Verfahren zum Einsatz.

In Ergänzung zu den bereits genannten Empfehlungen für die Güteüberwachung mineralischer Deponiebasisabdichtungen kann dann eine Empfehlung für die Anwendung von Schnellverfahren erarbeitet werden.

Ziel der in den nächsten Abschnitten vorgestellten Versuche ist, die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit verschiedener Prüfverfahren für bodenmechanische Kennwerte zu ermitteln. Dazu ist die statistische Auswertung und Darstellung der Ergebnisse erforderlich. Die angewandten Methoden werden im folgenden behandelt. Alle Messungen können nur mit einer bestimmten Genauigkeit ausgeführt werden. Völlig fehlerfreie Messungen sind nicht möglich. Die zur Bewertung gewonnener Ergebnisse durchzuführende Fehlerrechnung unterscheidet dabei verschiedene Fehlerarten:

- **grobe Fehler**
sind fehlerhafte Ablesungen an Meßinstrumenten und Verfahrensfehler,
- **systematische Fehler**
verfälschen ein Meßergebnis in stets gleichem Sinne, hervorgerufen zum Beispiel durch Eichfehler der Geräte oder auch Verfahrensunterschiede,
- **zufällige Fehler**
sind zurückzuführen z.B. auf die begrenzte Schärfe menschlicher Sinne und Unvollkommenheit der Meßinstrumente, werden ebenso oft negative wie positive Vorzeichen annehmen.

Der zufällige Fehler f bei der Messung einer Größe A kann beliebige Werte annehmen und ist damit eine stetige zufällige Größe, die durch ihr Verteilungsgesetz beschrieben ist. Am einfachsten und am gebräuchlichsten ist das Normalverteilungsgesetz (Bronstein, Semendjajew 1969), das auch für diese Arbeit zugrunde gelegt wird:

$$y = \frac{1}{s \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{f^2}{2 \cdot s^2}}$$

mit

y	= relative Häufigkeit eines Fehlers
f	= zufälliger Fehler einer Messung
s	= Standardabweichung

Dieses Verteilungsgesetz beruht auf der Forderung, daß der wahrscheinlichste Wert für eine unbekannte Größe das arithmetische Mittel dieser Werte ist. Wie später noch gezeigt wird, ist bei der Fragestellung der *wahren Wert* einer Meßgröße im allgemeinen nicht bekannt. Deshalb wird im folgenden als Näherungswert für den wahren Wert das *arithmetische Mittel* $\bar{x}$ angenommen (Großmann 1972):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum f_i$$

mit f_i = Größe der Einzelwerte

In Verbindung mit der einleitenden Unterscheidung der Fehlerarten führt dies zu folgender Definition:

- **Systematische Fehler** werden als der Unterschied der arithmetischen Mittel der Meßwerte zweier Prüfverfahren unter sonst gleichen Bedingungen definiert.
- **Zufällige Fehler** werden als die Abweichungen vom arithmetischen Mittel einer Meßreihe definiert.
- **Grobe Fehler** müssen aus Erfahrung und durch Kontrollmessungen erkannt und ausgeschieden werden. Besondere Ausreißertests sollen nicht durchgeführt werden.

Für einen Stichprobenumfang von $n > 30$ kann nach Schwarze (1975) mit hinreichender Genauigkeit die Normalverteilung zufälliger Fehler zugrunde gelegt werden. Zusätzlich wird im Rahmen dieser Arbeit das Kriterium nach Bronstein und Semendjajew (1969) angewendet. Danach ist das Normalverteilungsgesetz nicht anwendbar, wenn die nach den beiden folgenden Verfahren bestimmten Standardabweichungen s erheblich voneinander abweichen.

$$s^2 = \frac{\sum f_i^2}{n-1} \quad \text{und} \quad s = (\sqrt{\pi/2}) \cdot \mu$$

mit

$$\mu = \frac{\sum |f_i|}{\sqrt{n(n-1)}}$$

Als weiterer Anhaltswert für die Gültigkeit des Normalverteilungsgesetzes wird die Größe des Variationskoeffizienten v verwendet, der nicht größer als $v = 33 \%$ werden darf (Sachs 1974). Dabei gilt für den Variationskoeffizienten v :

$$v = \frac{s}{x} \cdot 100 [\%]$$

Die Fläche unter der Kurve der Normalverteilung entspricht der Gesamtheit aller auftretenden Fehler. Durch Integration zwischen zwei Grenzen erhält man die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Fehler zwischen diesen Grenzen auftritt. Als Bezugswert für zu wählende Grenzen werden häufig beliebige Vielfache der Standardabweichungen angegeben. Bild 39 zeigt tabel-

Wahrscheinlichkeit [%]	Vielfaches der Standardabweichung [-]
68,3	1,00
95,0	1,96
95,4	2,00
99,0	2,58
99,7	3,00

Bild 39: Fehler-Wahrscheinlichkeit für Vielfache der Standardabweichung

larisch einige Wahrscheinlichkeiten S , mit denen Fehler zwischen den Vielfachen u_s der Standardabweichung s liegen. Dieser Integration entstammt die häufig zu findende Formulierung, daß 95 % aller Meßfehler innerhalb der doppelten Standardabweichung liegen. In der Vermessungskunde wird die 3- bis 4fache Standardabweichung zufälliger Meßfehler als Fehlergrenze angesehen. Über diesen Grenzen liegende Messungen müssen wiederholt werden (Großmann 1972).

Zur mathematischen Beschreibung des Zusammenhangs zwischen zwei Variablen wird die Regressionsrechnung eingesetzt. Nach Kupke (1979) ist dafür der allgemeine Potenzansatz

$$y = a \cdot x^b + c$$

im allgemeinen ausreichend. Häufig ergibt sich als empirischer Zusammenhang der Sonderfall mit $b = 1$ (lineare Regression). Als Maß für die Bestimmtheit eines empirisch gefundenen

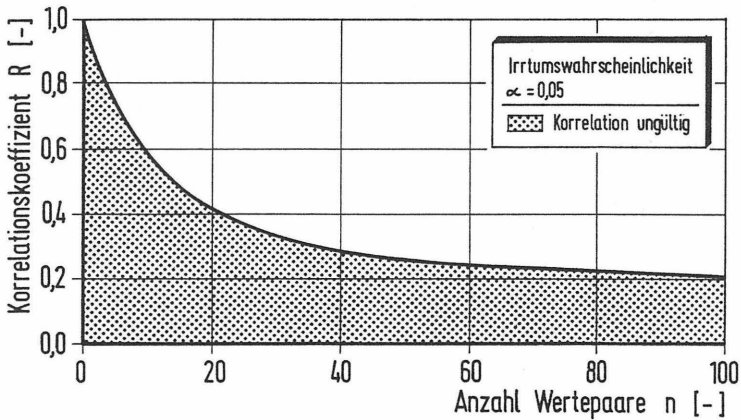


Bild 40: Gültigkeitsbereich für den mathematischen Zusammenhang zweier Variabler (nach Sachs 1974)

mathematischen Zusammenhangs wird das Bestimmtheitsmaß B^2 oder der Korrelationskoeffizient R (lineare Regression) nach Schwarze (1983) oder Kreyszig (1977) verwendet.

Gefundene mathematische Zusammenhänge zweier Variabler werden zunächst aus bodenmechanischer Sicht überprüft. Danach wird überprüft, ob die Bestimmtheit des Zusammenhangs, ausgedrückt durch das Bestimmtheitsmaß oder den Korrelationskoeffizienten, bei der Größe der untersuchten Stichprobe und der vorgegebenen Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % ausreichend ist. Bild 40 zeigt die grafische Darstellung der von Sachs (1974) tabellierten Werte.

6.2 Bestimmung des Wasserbindevermögens

6.2.1 Allgemeines

Mit der Bestimmung des Wasserbindevermögens sollte ein Parameter gefunden werden, der auf der Baustelle eine Abschätzung darüber erlaubt, ob der jeweils verwendete Boden noch der in der Eignungsprüfung zugrunde gelegten Schwankungsbreite der bodenmechanischen Kennwerte entspricht. Die Bestimmung des Wasserbindevermögens soll auch zur Qualitätskontrolle gelieferter Bentonitchargen verwendet werden.

Zur Überprüfung der Eignung dieses Versuchstyps wurden zunächst Versuche zur Reproduzierbarkeit und Genauigkeit ausgeführt.

Danach wurde der Zusammenhang dieses Parameters mit anderen wichtigen bodenmechanischen Kennwerten durch die Verwendung kontrolliert hergestellter Mischungen verschiedener Materialien untersucht.

Für alle Versuche wurde das von Neff (1959 und 1985) vorgestellte modifizierte Enslin-Gerät entsprechend Bild 21 verwendet. Alle Versuche im Labor des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik wurden nach einer einheitlichen Versuchsbeschreibung ausgeführt.

6.2.2 Genauigkeit und Reproduzierbarkeit

Bei den Versuchen war zwischen Versuchen mit bindigen Böden einerseits und mit Bentoniten andererseits zu unterscheiden. Während die Versuchsbeschreibung von Neff für bindige Böden eindeutig ist, sind bei Untersuchungen an Bentoniten Besonderheiten zu beachten. Dies galt insbesondere für die Versuchsdauer von mindestens 24 Stunden, den Verdunstungsschutz wegen der Versuchsdauer sowie die Probemenge. Um die Bedeutung dieser Einflüsse auf das Versuchsergebnis zu untersuchen, wurden sie getrennt untersucht.

Zunächst wurde der Einfluß des Verdunstungsschutzes untersucht. Dazu erhielt das verwendete Versuchsgerät über dem Probenraum einen Schliffstopfen, der unmittelbar nach dem Einfüllen der Probemenge aufgesetzt wurde. Nach Vorversuchen hat sich herausgestellt, daß dieser Schliffstopfen jedoch eine feine Kapillare erhalten mußte, weil der luftdichte Abschluß des Probenraumes zu einem geringen Überdruck bei Wasseranlagerung an die Probe führte. Dies drückte sich in einer geringeren Wasserbindevermögen aus. Der luftdichte Abschluß des Porenraumes führte bei längeren Versuchszeiten auch zu Verfälschungen des Versuchsergebnisses, wenn es im Versuchszeitraum zu Änderungen des Luftdrucks oder der Temperatur kam.

Der Einfluß des Verdunstungsschutzes wurde unter Verwendung von Quarzmehl untersucht, das im Gegensatz zu Bentonit seine Wasserbindung in kürzester Zeit abgeschlossen hat. In Bild 41 ist die Wasseraufnahme aus der Meßkapillare für die drei Fälle

- Verdunstung vom Filterstein ohne Probe und ohne Verdunstungsschutz (Nullversuch)
- Verdunstung von einem Probenkegel von 1,0 g Quarzmehl ohne Verdunstungsschutz
- Verdunstung von einem Probenkegel von 1,0 g Quarzmehl mit aufgesetztem Verdunstungsschutz

dargestellt. Dabei zeigte sich, daß die Verdunstungsraten mit und ohne Bodenprobe, jedoch ohne Verdunstungsschutz nahezu gleich und über einen Zeitraum von 48 Stunden konstant sind. Auch bei aufgesetztem Verdunstungsschutz ließen sich Wasserverluste zwar stark verringern, aber nicht vollständig verhindern.

Dieses Ergebnis führte zur Ergänzung der Versuchsbeschreibung dahingehend, daß trotz aufgesetztem Verdunstungsschutz Versuchsergebnisse für Bentonite immer auf einen Zeitraum von 24 Stunden bezogen wurden, um sie vergleichbar zu machen.

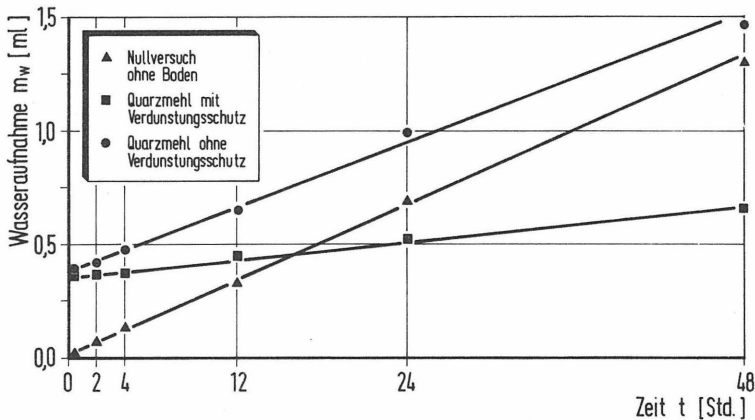


Bild 41: Verdunstungsraten im Versuch nach Enslin/Neff für längere Versuchszeiten

Bei Versuchen mit bindigen Böden ist seit Neff (1959) die zu verwendende Probemenge mit $G_t = 1,0$ g festgelegt. Diese Probemenge ist für Versuche mit Bentoniten zu groß. Zum einen gilt dies, weil die Meßkapillare nicht groß genug für die erforderliche Wassermenge ist, so daß Nachfüllen erforderlich würde. Zum anderen führt in Abhängigkeit vom Quellvermögen des verwendeten Bentonits die Probenkegelgröße im aufgequollenen Zustand zu Eigenspan-

nungszuständen, die das Ergebnis beeinflussen. Mit einem handelsüblichen Bentonit wurden deshalb Versuche mit verschiedenen Probemengen von $G_t = 0,1 \text{ g}$ bis $G_t = 1,0 \text{ g}$ bis zu einem Zeitraum von 48 Stunden durchgeführt. Bild 42 zeigt die Ergebnisse über die Zeit. Dabei wird deutlich, daß wegen der größeren Schüttdichte mit steigender Probemenge das Wasserbindevermögen geringer wird. Weiterhin ist zu erkennen, daß über den Zeitraum von 24 Stunden hinaus der Anstieg im Wasserbindevermögen nahezu unabhängig von der Probemenge und konstant verläuft, was wahrscheinlich wiederum auf Verdunstung zurückzuführen ist.

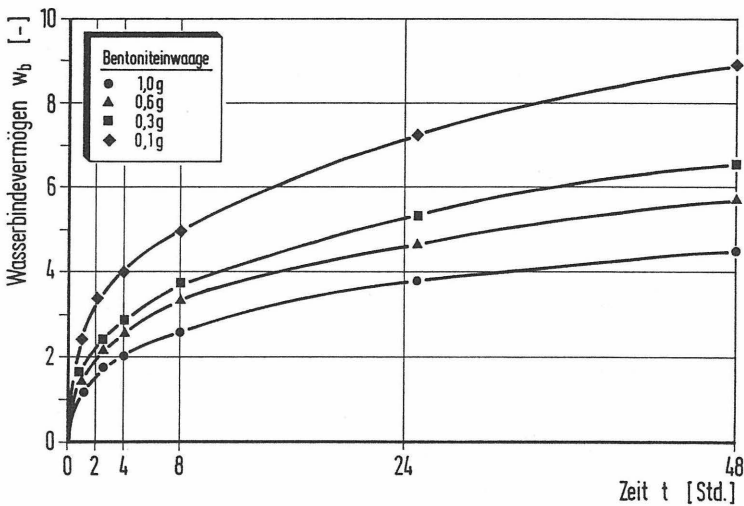


Bild 42: Wasserbindevermögen eines Bentonits bei Einsatz verschiedener Probemengen

Als Ergebnis dieser Versuche wurde der Versuchsablauf dahingehend geändert, daß für alle bindigen Böden weiterhin eine Probemenge von $G_t = 1,0 \text{ g}$ verwendet wurde, bei Bentoniten wurde jedoch eine Probemenge von $G_t = 0,3 \text{ g}$ gewählt. Die Grenze zwischen beiden Bereichen wurde für ein Wasserbindevermögen von $w_b = 2,5$ festgelegt, weil gerade dieser Bereich

in der Praxis kaum vorkommt. Alle bindigen Böden - auch fette Tone - weisen im allgemeinen ein Wasserbindevermögen bis $w_b = 1,5$ auf, handelsübliche Bentonite für mineralische Basisabdichtungen sollten ein Wasserbindevermögen von $w_b \geq 4,5$ aufweisen.

Mit den so gefundenen Versuchsabläufen wurden in einem nächsten Schritt Versuche zur Bestimmung der Reproduzierbarkeit durchgeführt. Dazu wurde ein toniger Boden und ein handelsüblicher Bentonit verwendet. Der tonige Boden wurde in kleinstückiger Form in einer Gesamtmenge von etwa 15 kg auf einer Baustelle entnommen, der Bentonit wurde als 50 kg-Sack geliefert. Der tonige Boden wurde durch mehrmalige Probenteilung und anschließendes erneutes Vermischen der kleinen Stücke homogenisiert. An 12 (toniger Boden) und 10 (Bentonit) aufeinander folgenden Werktagen wurden jeweils drei Parallelversuche zur Bestimmung des Wasserbindevermögens durchgeführt. Die dazu erforderliche Probenvorbereitung (Trocknen, Mörsern) wurde täglich für die jeweils benötigte Probemenge wiederholt. Alle Versuche wurden von einem Laboranten durchgeführt. Bild 43 zeigt die Häufigkeitsverteilung der gefundenen Einzelwerte.

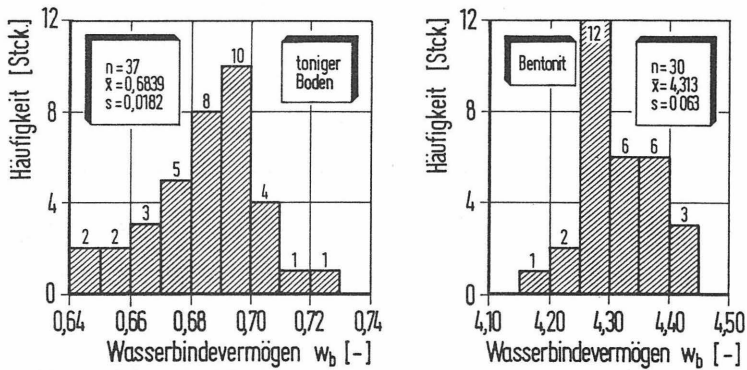


Bild 43: Versuchsergebnisse zur Bestimmung der Reproduzierbarkeit des Versuches nach Enslin/Neff

Die Standardabweichungen betrugen $s = 0,0182$ (toniger Boden) und $s = 0,063$ (Bentonit). Mit den angegebenen Mittelwerten ergaben sich Variationskoeffizienten von $v = 2,7\%$ (toniger Boden) und $v = 1,5\%$ (Bentonit). Der größere Variationskoeffizient für den tonigen Boden könnte auf mineralogische Inhomogenitäten in der Grundgesamtheit gegenüber dem im industriellen Herstellungsprozeß homogenisierten Bentonit zurückzuführen sein. Gegenüber anderen bodenmechanischen Standardversuchen ist die ermittelte Reproduzierbarkeit, ausgedrückt durch den relativen mittleren Fehler, sicher etwas geringer. Dies liegt vermutlich an den trotz genauer Versuchsbeschreibung möglichen Zufälligkeiten, z.B. bei der Form des sich beim Einschütten der Probe ergebenden Probenkegels.

Ein Ringversuch mit dem gleichen Bentonit in acht verschiedenen Labors an homogenisierten und durch Probenteilung gewonnenen Proben ergab demgegenüber ein noch ungünstigeres Ergebnis. Bild 44 zeigt die Zunahme des Wasserbindevermögens über einen Zeitraum von 24 Stunden. Wegen des geringen Stichprobenumfangs ist die Anwendung des Normalverteilungsgesetzes fragwürdig. Dennoch wird aus Gründen der Vergleichbarkeit mit vorherigen Ergebnissen das Normalverteilungsgesetz zugrunde gelegt. Für den Endwert des Wasserbindevermögens nach 24 Stunden ergibt sich bei einer Standardabweichung von $s = 0,90$ ein Variationskoeffizient von $v = 17,5\%$. Dem Verlauf der dargestellten Kurven ist auch zu entnehmen, daß der Versuchsablauf sicher nicht in allen Labors identisch ist. So zeigt z.B. die Kurve mit dem höchsten Endwert einen starken, konstanten Anstieg bis zum Versuchsende, was auf mangelhaften Verdunstungsschutz hindeutet. Die extrem großen Unterschiede der Anfangswerte nach einer Stunde deuten darauf hin, daß Unterschiede z.B. in der Probenmenge, in der Porosität des Filtersteins oder anderen Randbedingungen vorliegen müssen.

Die durchgeführten Untersuchungen zur Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Versuche zur Bestimmung des Wasserbindevermögens lassen erkennen, daß die zufälligen Fehler - hier interpretiert als die Versuchsabweichungen in einem Labor - gering sind. Der Versuch zur Bestimmung des Wasserbindevermögens weist also eine Genauigkeit auf, daß aus der Bestimmung dieser Eigenschaft Korrelationen zu anderen bodenmechanischen Eigenschaften abgeleitet werden können. Die systematischen Fehler beim Vergleich der Meßwerte aus verschiedenen Labors sind jedoch erheblich. Der Kennwert "Wasserbindevermögen" ist dennoch zur Güteüberwachung geeignet. Als Beurteilungsmaßstab für die Eignung eines Bodens ist er

solange nicht heranzuziehen, wie eine weitere Vereinheitlichung der Versuche nicht zur Verringerung der systematischen Fehler geführt hat.

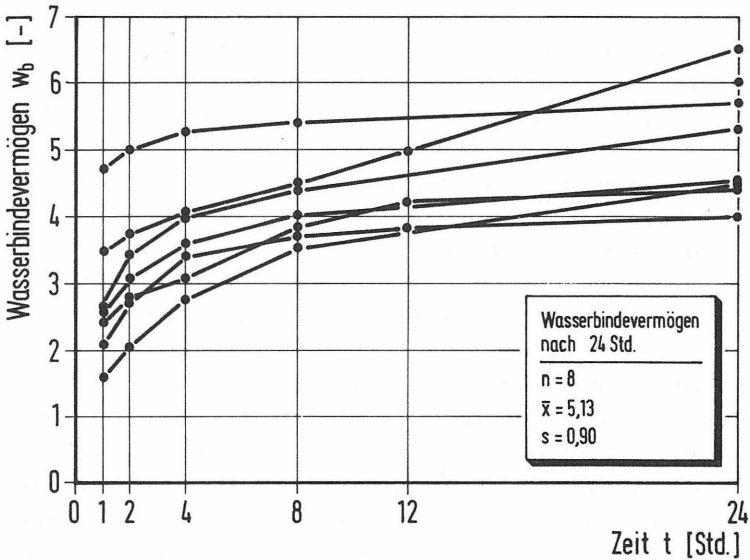


Bild 44: Ergebnis eines Ringversuchs zur Bestimmung des Wasserbindevermögens von Bentonit in acht Labors

6.2.3 Korrelation mit anderen Bodenkennwerten

Aufgrund der Auswertung des Schrifttums konnte keine eindeutige Beziehung zwischen der Wasserdurchlässigkeit und anderen bodenmechanischen Eigenschaften festgestellt werden. Am häufigsten werden Beziehungen zu den plastischen Eigenschaften der Abdichtungsmaterialien genannt. Deshalb sollte im folgenden vor allem die Beziehung zwischen dem Wasserbindevermögen und den Zustandsgrenzen untersucht werden.

Bild 45 zeigt die Kornverteilungskurven der für die Untersuchungen verwendeten Materialien Tonmehl, Quarzmehl und Quarzsand. Diese Materialien wurden deshalb verwendet, weil sie in einem industriellen Herstellungsprozeß mit konstanten Eigenschaften produziert werden. Streuungen der Versuchsergebnisse durch natürliche Inhomogenitäten der Proben sind deshalb vernachlässigbar. Zunächst wurden Mischungen aus den Materialien hergestellt, um die bodenmechanischen Eigenschaften kontrolliert zu verändern. Dabei wurde dem Tonmehl entweder Quarzmehl oder Quarzsand trocken zugemischt. Anschließend wurden die Mischungen über einen Zeitraum von mindestens 12 Stunden zum Ausquellen befeuchtet. Von den Mischungen wurden die Zustandsgrenzen nach DIN 18.122, die Proctordichte nach DIN 18.127 sowie das Wasserbindevermögen nach Enslin/Neff bestimmt.

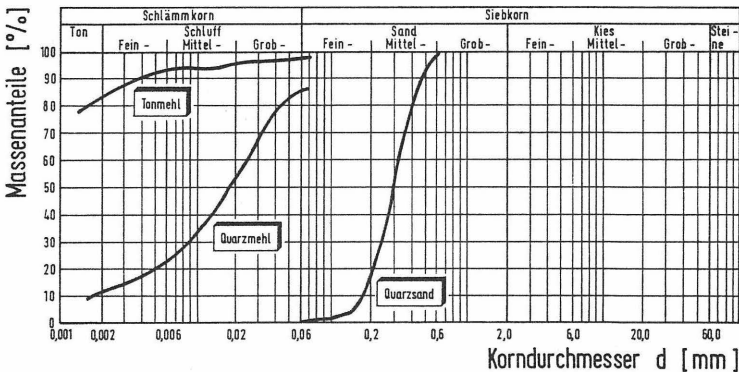


Bild 45: Kornverteilungskurven des verwendeten Tonmehls, Quarzmehls und Quarzsandes

Bild 46 zeigt die Kornverteilungen der Mischungen aus Tonmehl und Quarzmehl sowie die aus einfacher Bestimmung gefundenen Versuchsergebnisse. Bild 47 zeigt die entsprechenden Darstellungen für die Mischungen aus Tonmehl und Quarzsand. Der Darstellung ist zu entnehmen, daß die Zustandsgrenzen w_L und w_p , das Wasserbindevermögen w_b , aber auch der optimale Wassergehalt w_{pT} bis auf geringe Abweichungen linear vom Mischungsverhältnis

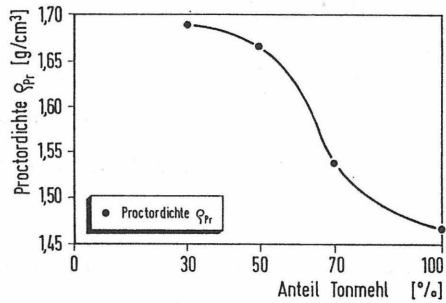
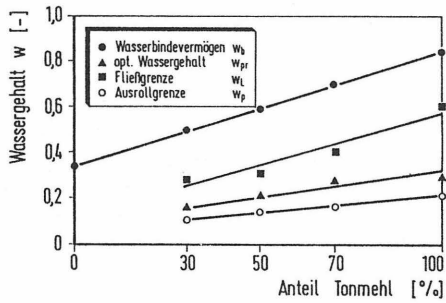
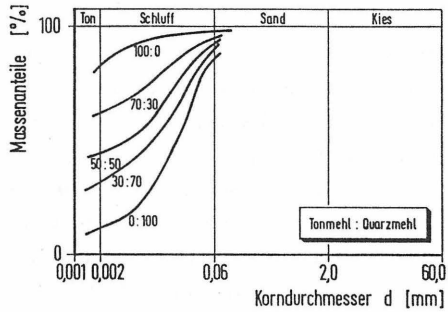


Bild 46: Kornverteilungen der Mischungen aus Tonmehl und Quarzmehl sowie deren Zustandsgrenzen, Proctordichten und Wasserbindevermögen

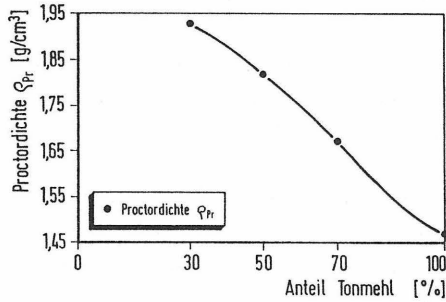
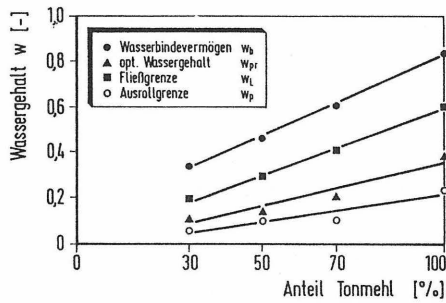
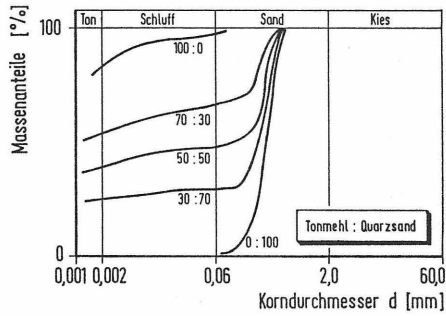


Bild 47: Kornverteilungen der Mischungen aus Tonmehl und Quarzsand sowie deren Zustandsgrenzen, Proctordichten und Wasserbindevermögen

abhängen. Dabei ist naturgemäß der Anstieg des jeweiligen Wassergehalts mit dem Anteil Tonmehl umso größer, je höher der absolute Wassergehalt ist. In der Reihenfolge steigender Wassergehalte sind dies

- Ausrollgrenze w_p
- optimaler Wassergehalt w_{pT}
- Fließgrenze w_L
- Wasserbindevermögen w_b .

Auch die Proctordichte hängt deutlich vom Anteil Tonmehl in den Mischungen ab. Indirekt sind die plastischen Eigenschaften auch hierfür die Ursache, weil durch das erhöhte Wasserbindevermögen bei Steigerung des Feinstanteils der Porenanteil der Proben vergrößert wird. Entsprechend steigt der optimale Wassergehalt und die Proctordichte fällt. Dieser Zusammenhang konnte deshalb mit hohem Bestimmtheitsmaß ermittelt werden, weil Inhomogenitäten des Materials nicht zu beachten waren. Deshalb sollten exemplarisch für die bei Güteüberwachungen wichtigen Kennwerte zwei Eigenschaften untersucht werden.

Schwankungen in den plastischen Eigenschaften lassen einen Hinweis auf die Änderung der bodenmechanischen Eigenschaften zu. Deshalb wurde die Fließgrenze w_L als Leitkennwert ausgewählt. Für den Baubetrieb ist die Frage nach dem erforderlichen Einbauwassergehalt von besonderer Bedeutung. Da die Verdichtungsarbeit im allgemeinen festliegt, gäbe die Anpassung des Einbauwassergehalts an die tatsächlichen Bodeneigenschaften große Sicherheit bezüglich der Einhaltung geforderter Verdichtungswerte. Als weiterer Leitkennwert wird deshalb der optimale Wassergehalt w_{pT} gewählt.

Der Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt w_L an der Fließgrenze und dem Wasserbindevermögen w_b konnte durch Auswertung zahlreicher Laboruntersuchungen untersucht werden. Dabei wurde kein Unterschied bezüglich der geologischen Herkunft, der mineralogischen Zusammensetzung, dem Verwitterungsgrad und den bodenmechanischen Eigenschaften gemacht. Die Versuchsergebnisse wurden im Lauf mehrerer Monate von verschiedenen Laboranten ermittelt. Bild 48 zeigt die Darstellung der Fließgrenze in Abhängigkeit vom Wasserbindevermögen. Es ist zu erkennen, daß der dargestellte lineare Zusammenhang aus-

reichend bestimmt ist. Allerdings ist eine Streubreite zu beobachten, die bei den bisherigen Versuchen nicht zu erkennen war. Dies ist vermutlich auf die Schwankung anderer bodenmechanischer Eigenschaften und der mineralogischen Zusammensetzung zurückzuführen. Auch Versuchsfehler bei beiden Versuchstypen sollten nicht außer Acht gelassen werden. Da jedoch nur Ergebnisse aus einem Labor bei Überwachung genauer Versuchsbeschreibungen enthalten sind, handelt es sich bei der festgestellten Streubreite um die Auswirkungen aller zufälligen Fehler und der unvermeidlichen systematischen Fehler.

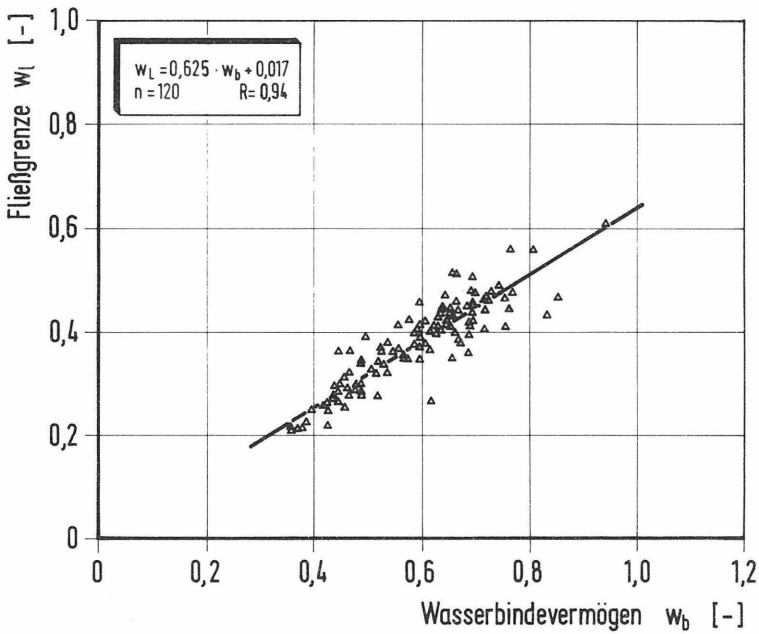


Bild 48: Darstellung der Fließgrenze w_L in Abhängigkeit vom Wasserbindevermögen w_b

Ein interessantes Ergebnis ist Bild 49 zu entnehmen. Der dargestellte Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt w_p an der Ausrollgrenze und dem Wasserbindevermögen w_b ist ebenfalls hinreichend bestimmt. Der geringe Anstieg der Ausrollgrenze über den gesamten denkbaren Streubereich bindiger Böden zeigt, daß die plastischen Eigenschaften überwiegend von der Fließgrenze abhängen. Im Rahmen von Güteüberwachungen ist deshalb die Bestimmung der Fließgrenze oder des Wasserbindevermögens stellvertretend für die Schwankung der plastischen Eigenschaften ausreichend.

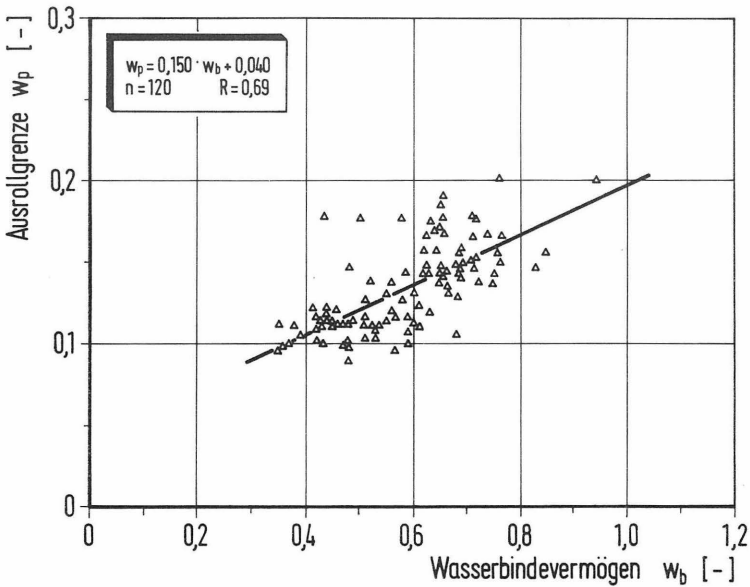


Bild 49: Darstellung der Ausrollgrenze w_p in Abhängigkeit vom Wasserbindevermögen w_b

Zur Überwachung der Schwankung der Verdichtungseigenschaften ist der Zusammenhang zwischen dem optimalen Wassergehalt w_{pT} und dem Wasserbindevermögen w_b von Bedeutung. Bild 50 zeigt den Zusammenhang, wie er an Proben unterschiedlicher Herkunft ermittelt wurde.

Der Zusammenhang zwischen beiden Eigenschaften ist zwar vorhanden, der Korrelationskoeffizient für den dargestellten Zusammenhang ist jedoch für die Probenzahl relativ gering. Dafür sind vor allem zwei Gründe zu nennen. Zum einen wird der Proctorversuch durch die

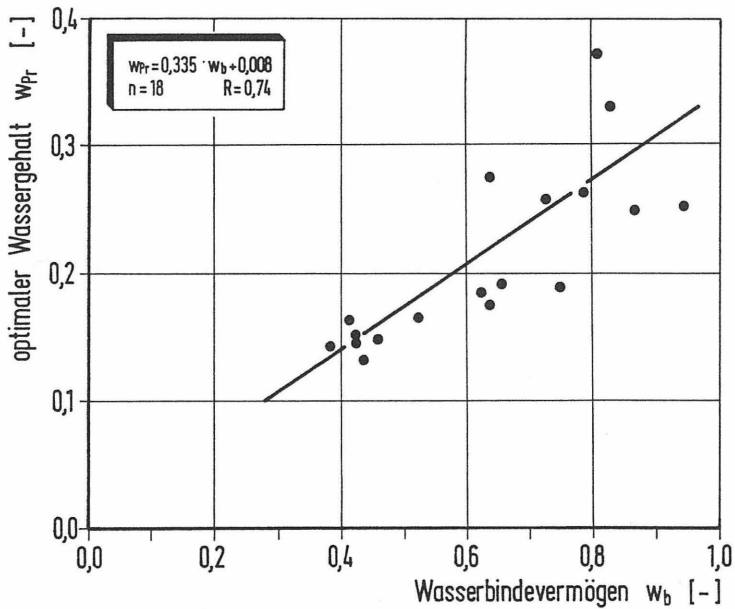


Bild 50: Darstellung des optimalen Wassergehalts w_{pT} in Abhängigkeit vom Wasserbindevermögen w_b

Änderung zahlreicher bodenmechanischer Eigenschaften beeinflusst. Zum anderen ist erfahrungsgemäß der Proctorversuch derjenige bodenmechanische Standardversuch, der die größten systematischen Fehler erwarten läßt.

6.2.4 Beurteilung

Bei der Bestimmung des Wasserbindevermögens w_b ist mit einem relativen mittleren Fehler - ausgedrückt durch die einfache Standardabweichung - von

$$\Delta w_b = \pm 0,025 \cdot w_b$$

zu rechnen. Diese Fehlergrenzen konnten sowohl für die Untersuchung bindiger Böden als auch für Bentonite nachgewiesen werden. Zur Einhaltung dieser Fehlergrenzen ist es jedoch erforderlich, die beschriebene strenge Reglementierung einzuhalten. Da diese Reglementierung noch nicht allgemein üblich ist, gelten die Fehlergrenzen nur für die Ergebnisse aus einem Labor. Bei Versuchsergebnissen verschiedener Laboratorien (siehe Bild 44) muß ein relativer mittlerer Fehler von mindestens

$$\Delta w_b = \pm 0,15 \cdot w_b$$

berücksichtigt werden.

Die Untersuchung der Korrelation zu anderen bodenmechanischen Kennwerten hat ergeben, daß Korrelationen mit hoher Bestimmtheit vor allem mit den Zustandsgrenzen, insbesondere mit dem Wassergehalt w_L an der Fließgrenze bestehen. Korrelationen mit geringerer Bestimmtheit bestehen zu den Verdichtungseigenschaften des Bodens, z.B. zum optimalen Wassergehalt w_{p-} .

Der Versuch zur Bestimmung des Wasserbindevermögens nach Enslin/Neff ist mit einigen notwendigen zusätzlichen Reglementierungen für die schnelle Kontrolle der Schwankung bodenmechanischer Eigenschaften geeignet. Das gilt auch für die Kontrolle der Eigenschaften

von Bentoniten, die zur Einmischung verwendet werden sollen. Es ist jedoch wegen der geringen Reproduzierbarkeit der Versuche bei der Modifizierung von Versuchsrandbedingungen erforderlich, z.B. im Rahmen des Probefeldes Eichkurven für die Korrelation zu anderen bodenmechanischen Kennwerten für jeden Boden neu aufzustellen.

6.3 Bestimmung des Wassergehalts mit Mikrowellen

6.3.1 Allgemeines

Die Bestimmung des Wassergehalts ist für die Güteüberwachung mineralischer Deponieba-sisabdichtungen von entscheidender Bedeutung. Dies gilt sowohl für die Kontrolle des Grundmaterials, um das Material nötigenfalls auf den erforderlichen Einbauwassergehalt einzustellen, als auch für die Verdichtungskontrolle. Das Standardverfahren zur Wassergehaltsbestimmung ist die Ofentrocknung. Für die in Frage kommenden bindigen Böden mit den relativ hohen Wassergehalten sind jedoch lange Trocknungszeiten erforderlich. Im allgemeinen ist dabei von 24 Stunden auszugehen.

Aus dem Schrifttum war bekannt, daß von allen Schnellverfahren, die eine ausreichende Genauigkeit erwarten ließen, die Bestimmung des Wassergehalts im Mikrowellenherd die schnellste und einfachste Methode ist.

Zur Überprüfung der Eignung dieses Versuchstyps wurden zunächst Versuche zur Genauigkeit und Reproduzierbarkeit ausgeführt. Dabei kam es vor allem auf den Vergleich mit dem Verfahren der Ofentrocknung an.

Für alle Versuche wurde ein handelsüblicher Mikrowellenherd mit Drehteller, vier Leistungsstufen bis 600 W und mit Sekundengenauigkeit programmierbarer Zeitschaltuhr verwendet.

6.3.2 Genauigkeit und Reproduzierbarkeit

6.3.2.1. Vorversuche

Im ersten Schritt der Untersuchungen mußten die möglichen Materialien für Gefäße ermittelt werden. Dazu wurden je 3 Probegefäße aller in Frage kommenden Materialien mit je 50 g eines Tones mit einem Wassergehalt von etwa $w = 0,30$ gefüllt und mit der größten Leistungsstufe im Mikrowellenherd getrocknet. Dabei ergab sich folgendes Bild:

- **Normalglas (Petrischalen)** erhitzt sich sehr schnell, häufig zersprangen die Schalen, ist ungeeignet
- **Borosilikatglas (Duran 50)** wird nur etwas warm, erhitzt sich nur an Stellen mit direktem Kontakt zur Bodenprobe, einmal ebenfalls zersprungen, bedingt geeignet
- **Polyäthylen** erwärmt sich, beginnt weich zu werden und schmilzt, ist ungeeignet
- **Polypropylen** bleibt während des Versuchs kühl, wird nur durch Kontakt mit der Bodenprobe erwärmt, ist geeignet
- **Porzellan (Glühtiegel)** erhitzt sich schnell, ist beständig, ist geeignet
- **Pappe (Schachteln)** erwärmt sich durch Eigenfeuchte, bei großen Wassermengen Selbstentzündung, nicht zu reinigen (Einwegbehälter), ungeeignet
- **Metall** reflektiert Mikrowellen und zerstört das Gerät, ungeeignet

Wegen der einfachen Beschaffung wurden für alle folgenden Versuche Glühtiegel aus Porzellan (hohe Form) verwendet. Bereits in den Vorversuchen wurde beobachtet, daß bei der Trocknung von Tonen wegen des schnellen Verdampfens der Boden in Stücke zerspringt.

Dabei springen sogar Stücke aus den Probengefäßen heraus, so daß das Abdecken mit einem lose aufgelegten Deckel, ebenfalls aus Porzellan, erforderlich wurde. Bild 51 zeigt die für alle weiteren Versuche verwendeten Probegefäße.

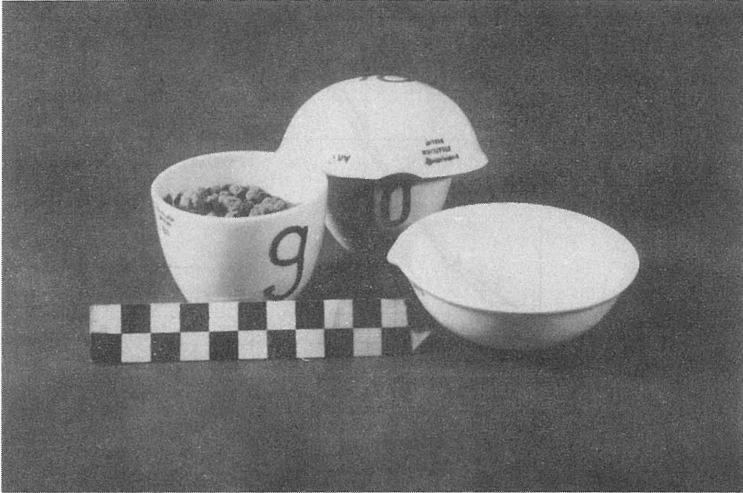


Bild 51: Glühtiegel aus Porzellan mit Deckel für die Bestimmung des Wassergehalts im Mikrowellenherd

Im nächsten Untersuchungsschritt wurden orientierende Versuche zur Bestimmung der erforderlichen Energie, der Trocknungszeiten sowie der Probenmengen durchgeführt. Dazu wurden 150 g eines feuchten Bodens mit einem Wassergehalt von $w = 0,50$ (Wassermasse $m_w = 50$ g) bei der Leistungsstufe 360 W getrocknet. Anschließend wurden 50 g Wasser ohne den Bodenanteil unter sonst gleichen Bedingungen getrocknet. Bild 52 zeigt das Ergebnis dieses Versuches. Ein signifikanter Unterschied im Verlauf des Trocknungsvorgangs über die Zeit ist nicht festzustellen. Aus diesem Grund wurden die folgenden Versuche zur Bestimmung der erforderlichen Trocknungszeiten in Abhängigkeit von der Wassermasse und der Leistungsstufe nur mit Wasser durchgeführt.

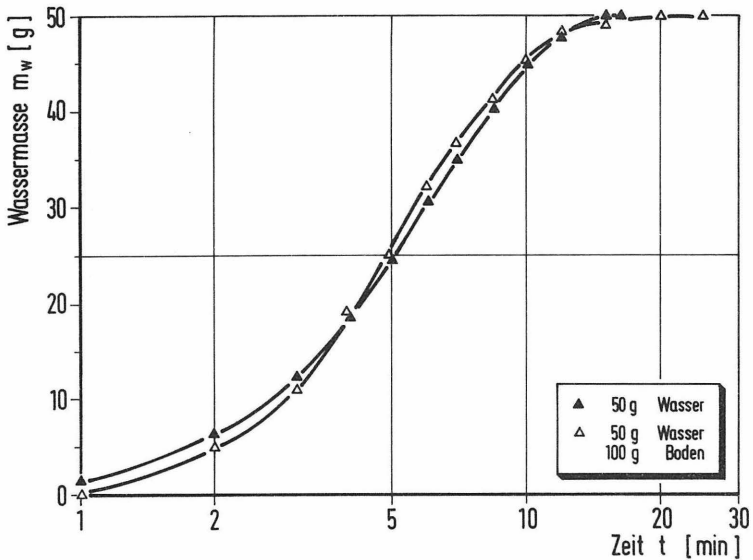


Bild 52: Trocknungszeiten für je 50 g Wasser mit und ohne Bodenanteil bei der Leistungsstufe 360 W

Je 100 g Wasser wurden, verteilt auf 3 Tiegel, bei den Leistungsstufen 90 W, 180 W, 360 W und 600 W verdampft, um einen Überblick über die erforderlichen Trocknungszeiten zu erhalten. Das Ergebnis dieser Versuche ist in Bild 53 dargestellt. Es ist zu erkennen, daß zum Verdampfen der 100 g Wasser bei der geringsten Leistungsstufe von 90 W eine Zeit von 119 min erforderlich ist, während bei der höchsten Leistungsstufe von 600 W lediglich 16 min nötig waren. Die sich für die jeweiligen Leistungsstufen ergebenden Verdampfungsraten über die Zeit sind in Bild 54 dargestellt. Hier ist bei jeder Leistungsstufe zunächst eine Aufwärmphase zu erkennen. Nach einem Maximum ist dann jedoch eine stete Abnahme der Verdampfungsrates zu beobachten, die mit der Abnahme der verbleibenden Wassermasse einher geht. Die Fläche unter den Kurven entspricht dabei der Wassermasse.

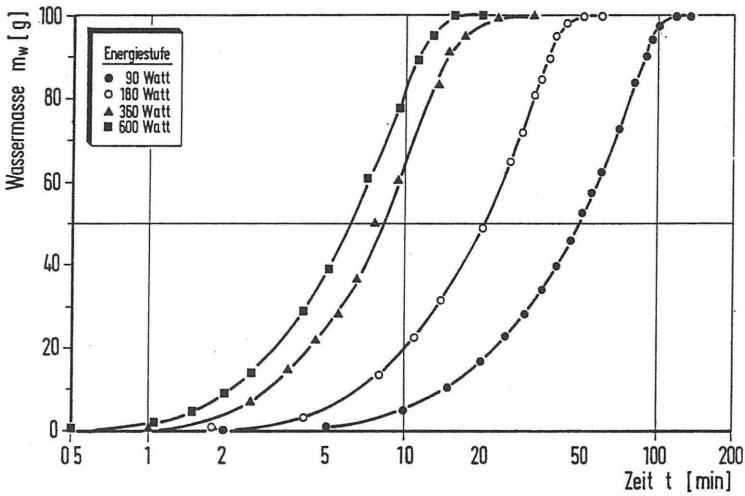


Bild 53: Erforderliche Zeit zum Verdampfen von je 100 g Wasser für die Leistungsstufen 90 W bis 600 W im Mikrowellenherd

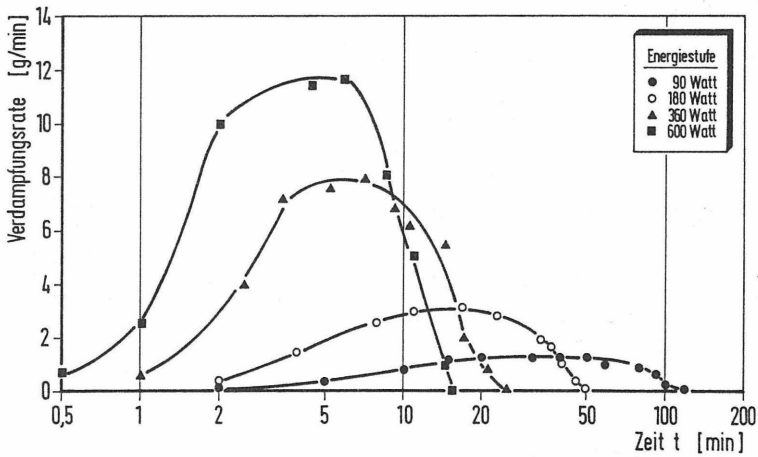


Bild 54: Verdampfungsraten bei 100 g Wasser und den Leistungsstufen 90 W bis 600 W über die Zeit

In einer weiteren Versuchsserie wurden die Wassermassen 10 g, 20 g, 50 g und 100 g bei der Leistungsstufe 360 W verdampft. Die Ergebnisse über die Zeit sind in Bild 55 normiert dargestellt. Die zugehörigen Verdampfungsraten zeigt Bild 56. Auch hier wird die Aufwärmphase dadurch deutlich, daß die Lage und die Höhe der Verdunstungsmaxima von der absoluten Wassermasse zu Beginn des Versuchs abhängt. Aus dieser Darstellung lassen sich die erforderlichen Trocknungszeiten sehr gut ablesen.

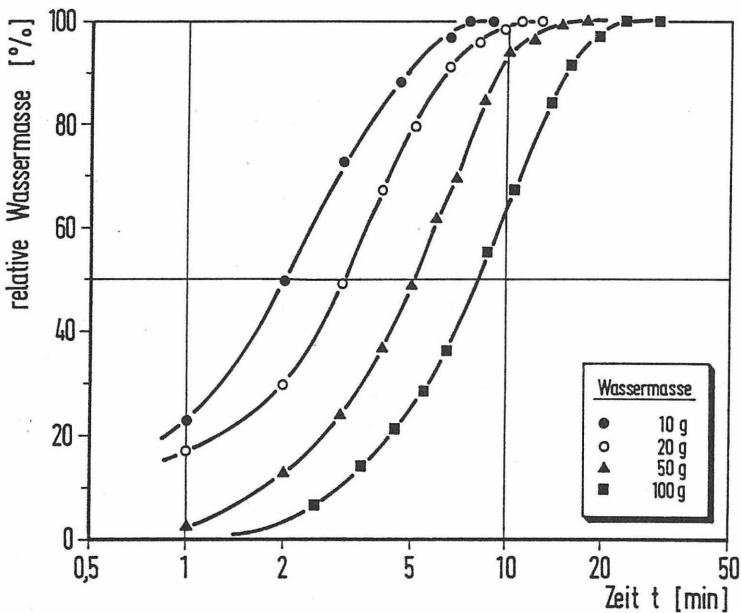


Bild 55: Verdampfung von Wassermassen von 10 g bis 100 g bei der Leistungsstufe 360 W im Mikrowellenherd

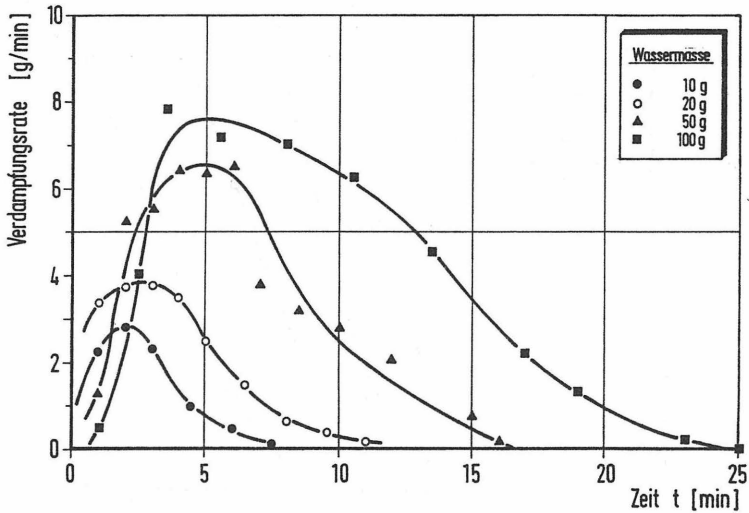


Bild 56: Verdampfungsraten bei 10 g bis 100 g Wasser und der Leistungsstufe 360 W

Bild 57 zeigt die Darstellung der erforderlichen Trocknungszeit in Abhängigkeit von der Wassermasse und der Leistungsstufe. Die bisherigen Versuche wurden alle mit mehreren Zwischenwägungen ausgeführt. Da dies für Routineversuche zur Wassergehaltsbestimmung nicht möglich ist, wurden die ermittelten Trocknungszeiten für alle folgenden Versuche um einen Sicherheitszuschlag von 50 % erhöht. Für jeden neuen Boden, an dem Untersuchungen durchgeführt wurden, wurde dieses Vorgehen überprüft.

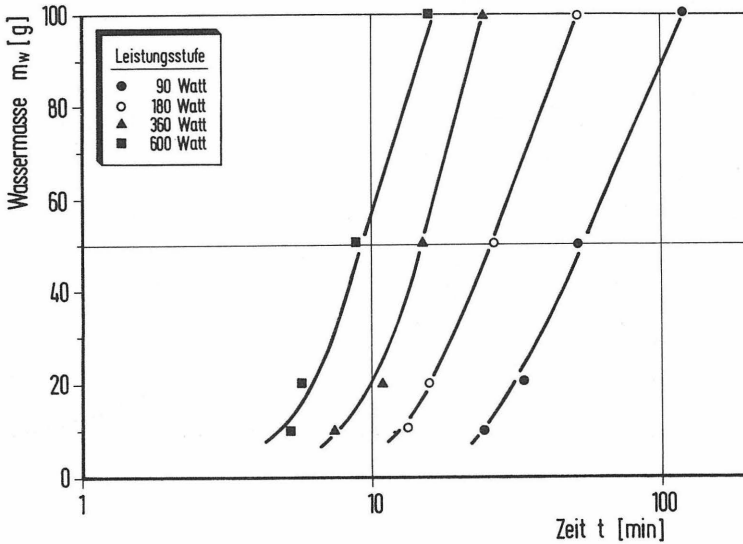


Bild 57: Ermittelte Trocknungszeiten für Wassermassen von 10 g bis 100 g und Leistungsstufen von 90 W bis 600 W im Mikrowellenherd

6.3.2.2 Versuche mit Böden

Für die Versuche mit Böden wurden vier Bodenarten mit unterschiedlichen bodenmechanischen Eigenschaften und mineralogischer Zusammensetzung verwendet. Eine Übersicht über diese Kennwerte zeigt Bild 58.

Von jedem Boden wurden mit den Verfahren der Probenteilung je 12 Teilproben zu je etwa 60 g hergestellt. Das Quarzmehl und das Tonmehl wurde dazu vorher mit Wasser angemischt. An je 6 Teilproben eines Bodens wurde der Wassergehalt durch Ofentrocknung bestimmt, an den anderen 6 Teilproben der Wassergehalt im Mikrowellenherd bei der Leistungsstufe 600 W. Bild 59 zeigt die Mittelwerte des zeitlichen Verlaufs der Trocknung im Mikrowellen

Kennwert	Dim.	Quarzmehl	Tonmehl	Schluff	Ton
Tongehalt T	%	12	83	14	56
Schluffgehalt U	%	74	14	63	35
Sandgehalt S	%	14	3	23	9
Fließgrenze w_L	-	-	0,602	0,290	0,537
Ausrollgrenze w_p	-	-	0,201	0,121	0,201
Plastizitätszahl I_p	-	-	0,401	0,169	0,336
Wasserbindevermögen w_b	-	0,353	0,820	0,455	0,860
Bodengruppe	-	-	TA	ST	TA
Kalkgehalt v_{ca}	-	0	0	0,160	0,046
Glühverlust v_{gl}	-	0	0,059	0,022	0,082

Bild 58: Überblick über die bodenmechanischen Eigenschaften der Versuchsböden

herd sowie im Vergleich dazu die Mittelwerte der sich nach 24 Stunden Trocknung ergebenden Wassergehalte durch Ofentrocknung.

Bei der Auswertung des Bildes 59 wird noch einmal deutlich, daß die im vorigen Abschnitt ermittelten Trocknungszeiten ausreichend sind. Im allgemeinen war die Trocknung nach einer Zeit von deutlich unter 10 min abgeschlossen, obwohl jeweils etwa 180 g feuchter Boden mit Wassergehalten von $w = 0,25$ bis $w = 0,40$ gleichzeitig getrocknet wurden.

Die Versuche mit Quarzmehl zeigten als einzige, daß zwischen der Trocknung mit Mikrowellen und der Ofentrocknung kein signifikanter Unterschied im Endwert besteht. Die drei anderen Böden ergaben höhere Wassergehalte bei der Trocknung mit Mikrowellen. Bezogen auf

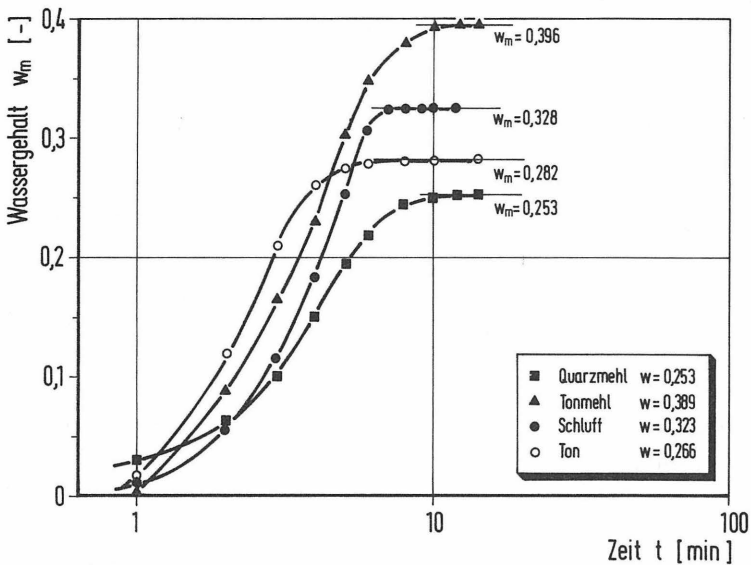


Bild 59: Verlauf der Trocknung der vier Versuchsböden im Mikrowellenherd und Wassergehalte durch Ofentrocknung

die Trockenmasse des Bodens ergaben sich dabei die in Bild 60 zusammengestellten Werte. Unter Berücksichtigung der Erfahrungen aus der Auswertung des Schrifttums dürfte dies beim Schluff auf den hohen Kalkgehalt zurückzuführen sein. Bei den Tönen war aufgrund der zum Teil hohen Temperaturen bei der Trocknung damit zu rechnen, daß das in den Tonmineralen gebundene Kristallwasser zumindest teilweise ausgetrieben wurde. Diesen Effekten wurde nicht näher nachgegangen.

Ein Probefeld, bei dem der schon beschriebene Schluff lagenweise verdichtet eingebaut wurde, konnte zu Vergleichsuntersuchungen zwischen der Bestimmung des Wassergehalts durch Ofentrocknung und durch Mikrowellen genutzt werden. An 41 Stellen wurden Proben

Boden	Wassergehalte		
	Ofen	Mikrowelle	Differenz
	w [-]	w _m [-]	w [-]
Quarzmehl	0,253	0,254	0,001
Tonmehl	0,387	0,396	0,009
Schluff	0,323	0,328	0,005
Ton	0,266	0,282	0,016

Bild 60: Unterschiede der Wassergehalte durch Ofentrocknung und durch Mikrowelle für vier Versuchsböden

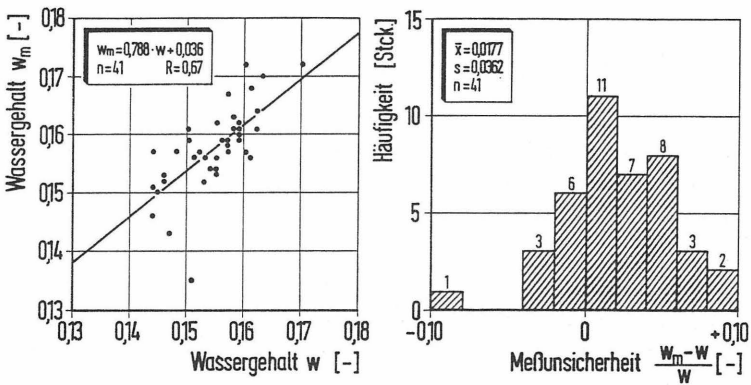


Bild 61: Vergleich der Wassergehalte aus Ofentrocknung und Mikrowellen für ein Probefeld

entnommen, die - mit jeweils 3 Teilproben - nach beiden Verfahren untersucht wurden. Bild 61 zeigt die Wassergehalte durch die Mikrowellen in Abhängigkeit von den Wassergehalten aus Ofentrocknung. Die Korrelation ist zwar deutlich, aber nur von mittlerer Bestimmtheit. Die Abweichungen zwischen den Meßwerten einer Probe sind als Meßunsicherheit

$$f = \frac{w_m - w}{w}$$

dargestellt. Dabei wird deutlich, daß es einen systematischen Fehler von $\Delta w = 0,0177 \cdot w$ gibt. Dieser systematische Fehler entspricht etwa dem, der schon bei Untersuchungen an den vier Versuchsböden beobachtet wurde. Die Streuung der Versuchsergebnisse, ausgedrückt durch die einfache Standardabweichung der Ergebnisse $s = 0,0362 \cdot w$ ist sehr hoch. Berücksichtigt man zur Abschätzung der Fehlergrenzen die doppelte Standardabweichung, ist die Meßunsicherheit mit $f \approx 0,072 \cdot w$ so groß, daß sie für Gütekontrollen mineralischer Deponiebasisabdichtungen sicher nicht ausreichend wäre.

Diese Ergebnisse entsprechen nicht den Erfahrungen, die in den bisherigen Vorversuchen mit der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gemacht wurden. Es war zu vermuten, daß die vorgefundenen Meßunsicherheiten nicht nur in den Ungenauigkeiten eines Verfahrens - in diesem Fall des Verfahrens mit Mikrowellen - zu suchen ist, sondern eher in zufällige Fehlern, die vor der eigentlichen Wassergehaltsbestimmung gemacht wurden. Hier wären die Zufälligkeiten der Probenahme und die Inhomogenitäten der Proben zu nennen. Diese Problematik war Anlaß für die im folgenden geschilderten Versuche.

Zwei der oben bereits beschriebenen Versuchsböden, das Quarzmehl und der Ton, wurden für ergänzende Versuche ausgewählt. Das Quarzmehl wurde gewählt, weil es ein sehr homogenes Material ist, bei dem die Versuche keine Unterschiede zwischen der Trocknung im Ofen und mit Mikrowellen gezeigt haben. Der Ton wies die größten Unterschiede auf, zudem entspricht er am ehesten den tatsächlich für mineralische Basisabdichtungen eingesetzten Böden. Die Böden wurden homogenisiert. Das Quarzmehl wurde dazu in einer Charge auf

einen Wassergehalt von etwa $w = 0,25$ eingestellt. Der Ton wurde bei natürlichem Wassergehalt gehäckselt und anschließend gut durchgemischt. Danach wurde eine Versuchsbeschreibung erstellt, nach der alle im Labor des Institut für Grundbau und Bodenmechanik tätigen Personen die Bestimmung des Wassergehalts mit Mikrowellen auszuführen hatten. Die Bestimmung des Wassergehalts durch Ofentrocknung sollte entsprechend der Norm so durchgeführt werden, wie dies üblich ist. Im Rahmen dieser Versuchsserie kamen je 39 Teilversuche mit Quarzmehl und je 78 Teilversuche mit Ton zustande. Die Ergebnisse der Versuche sind in Bild 62 und 63 dargestellt.

Bild 62 zeigt die Ergebnisse mit Quarzmehl. Nahezu analog zu den vorherigen Versuchen ist ein signifikanter systematischer Fehler nicht nachzuweisen. Die Abweichung der Mittelwerte beträgt $\Delta w = 0,0006$ zwischen der Bestimmung des Wassergehalts durch Ofentrocknung und mit Mikrowellen. Der zufällige Fehler durch alle Fehler der Probenahme und der Versuchsdurchführung bei einem mittleren Wassergehalt von etwa $w = 0,25$ beträgt $s = 0,008$ beim Verfahren der Ofentrocknung und $s = 0,007$ beim Mikrowellenverfahren. Analog zur vorherigen Bewertung der Ergebnisse des Probefeldes entspricht dies einer Meßunsicherheit - ausgedrückt durch die einfache Standardabweichung - von $f \approx 0,032 \cdot w$ (Ofentrocknung) und $f \approx 0,028 \cdot w$ (Mikrowelle). Für beide Verfahren liegen die gefundenen Meßunsicherheiten damit im Bereich der zulässigen Werten der DIN 18.121, gleichermaßen aber im Bereich der Ergebnisse, die beim Probefeld gefunden wurden.

Bild 63 zeigt die Ergebnisse mit Ton. Hier ist - auch analog zu den vorherigen Versuchen - ein systematischer Fehler nachzuweisen. Die Abweichung der Mittelwerte beträgt $\Delta w = 0,0126$ zwischen der Bestimmung des Wassergehalts durch Ofentrocknung und mit Mikrowellen. Der zufällige Fehler durch alle Fehler der Probenahme und der Versuchsdurchführung bei einem mittleren Wassergehalt von etwa $w = 0,27$ beträgt $s = 0,007$ beim Verfahren der Ofentrocknung und $s = 0,006$ beim Mikrowellenverfahren. Analog zur vorherigen Bewertung der Ergebnisse des Probefeldes entspricht dies einer Meßunsicherheit - ausgedrückt durch die einfache Standardabweichung - von $f \approx 0,026 \cdot w$ (Ofentrocknung) und $f \approx 0,022 \cdot w$ (Mikrowelle). Für beide Verfahren liegen die Meßunsicherheiten damit im Bereich der zulässigen Werte der DIN 18.121.

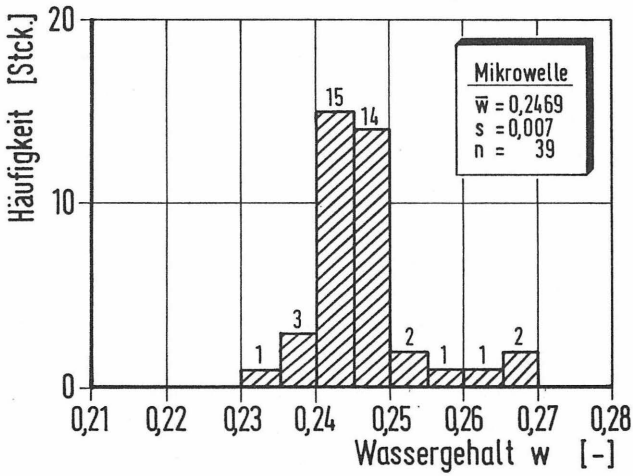
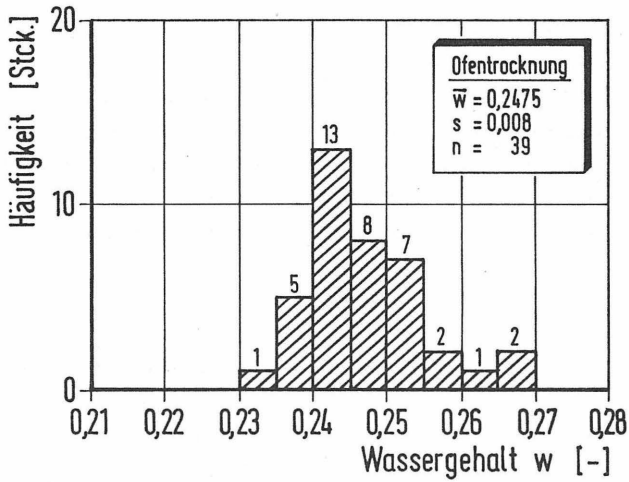


Bild 62: Ergebnisse der Vergleichsbestimmung der Wassergehalte durch Ofentrocknung und mit Mikrowellen an Quarzmehl

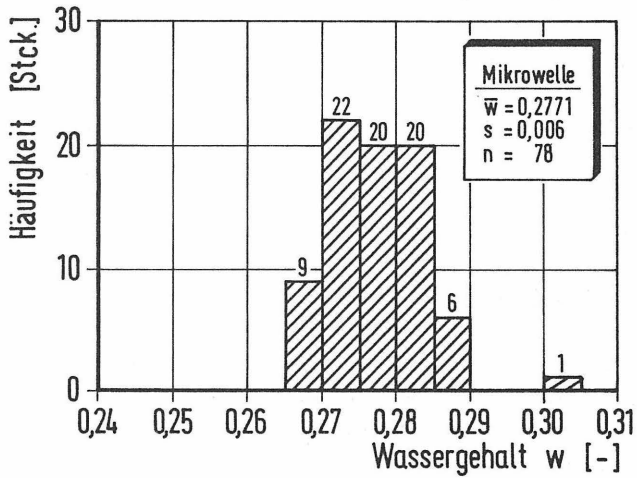
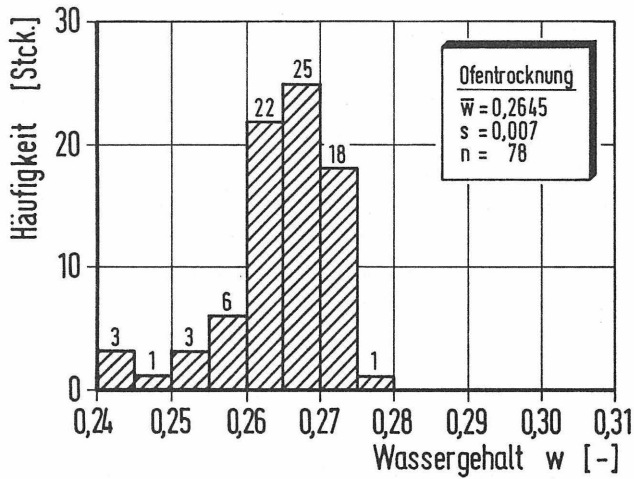


Bild 63: Ergebnisse der Vergleichsbestimmung der Wassergehalte durch Ofentrocknung und mit Mikrowellen an Ton

6.3.3 Einfluß auf andere Bodenkennwerte

Für viele bodenmechanische Standardversuche, z.B. die Bestimmung der Zustandsgrenzen, des Glühverlusts, des Kalkgehalts und der Korndichte, ist die Bestimmung des Wassergehaltes oder die vorherige Trocknung des Bodens erforderlich. Wie die bisherigen Versuche gezeigt haben, können Böden durch Trocknung mit Mikrowellen in anderer Weise in ihren Eigenschaften verändert werden, als durch Ofentrocknung. Bis zur Erforschung dieser Vorgänge sollte die Trocknung von Böden als Vorversuch vor anderen Versuchen nur dann mit Mikrowellen ausgeführt werden, wenn die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gesichert ist.

6.3.4 Beurteilung

Die erforderliche Trocknungszeit eines bindigen Bodens durch Mikrowellen beträgt nur wenige Minuten. Im allgemeinen sind 10 Minuten ausreichend. Dieser Zeitgewinn ist für die Güteüberwachung mineralischer Basisabdichtungen von großer Bedeutung.

Bei der Bestimmung des Wassergehalts durch Trocknung mit Mikrowellen ist mit einem relativen mittleren Fehler - ausgedrückt durch die einfache Standardabweichung - von

$$\Delta w = 0,025 \cdot w$$

zu rechnen. Diese Fehlergrenzen sind nahezu identisch zu denen, mit denen beim genormten Verfahren der Ofentrocknung unter sonst gleichen Bedingungen zu rechnen ist. Die bei der Untersuchung eines Probefeldes gefundene Korrelation von nur mittlerer Bestimmtheit ist auf zufällige Fehler zurückzuführen, die nicht durch ein bestimmtes Verfahren der Trocknung bedingt sind. Die Reproduzierbarkeit der Bestimmung des Wassergehalts mit Mikrowellen ist der der Ofentrocknung gleichwertig.

In Abhängigkeit von der Bodenart ist mit unterschiedlichen systematischen Fehlern beim Vergleich beider Verfahren zu rechnen. Der größte nachgewiesene systematische Fehler beträgt

$$\Delta w \approx 0,065 \cdot w$$

für einen Ton. Dieser systematische Fehler ist für die Güteüberwachung mineralischer Basisabdichtung von Bedeutung. Er muß durch Vergleichsuntersuchungen vor Beginn der Güteüberwachung bestimmt werden.

Auf die Trocknung von Proben mit Mikrowellen für andere bodenmechanische Standardversuche sollte verzichtet werden.

6.4. Bestimmung von Dichte und Wassergehalt mit dem radiometrischen Verfahren

6.4.1 Allgemeines

Aus der Auswertung des Schrifttums ist bekannt, daß die Bestimmung der Kennwerte Dichte und Wassergehalt am ehesten eine Korrelation dieser Werte mit dem erreichten Durchlässigkeitsbeiwert erwarten läßt. Im Rahmen von Güteüberwachungen mineralischer Deponiebasisabdichtungen wird immer eine Bestimmung dieser Kennwerte vorgenommen. Mit der Bestimmung der Feuchtdichte durch die genormten Verfahren ist eine relativ große Zerstörung der Abdichtung im Bereich der Probenahmestelle verbunden. Die Bestimmung des Wassergehalts zur Errechnung der Trockendichte erfordert, wie schon mehrfach beschrieben, einen relativ langen Zeitraum. Die Bestimmung von Dichte und Wassergehalt möglichst in einem kombinierten Schnellverfahren, das zerstörungsfrei arbeitet, wäre ein bedeutender Schritt für die Güteüberwachung von mineralischen Basisabdichtungen.

Im Erdbau und Asphaltbau ist die Verwendung radiometrischer Sonden gebräuchlich. Ob dieses Verfahren auch für die Güteüberwachung von Basisabdichtungen geeignet ist, wurde mit Eich- und Kalibrierversuchen und auf Probefeldern untersucht. Untersuchungsziel war die Bestimmung der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit des Gerätes.

6.4.2 Verwendete radiometrische Sonde

6.4.2.1 Beschreibung der Sonde

Für alle Untersuchungen wurde eine radiometrische Sonde des Typs 3411 B der Firma TROXLER Electronics, Triangle Park, North Carolina (USA) / Alling bei München verwendet. Es handelt sich um eine kombinierte Aufsetz- und Einstichsonde (Bild 64).

Das Meßgerät umfaßt zwei umschlossene radioaktive Strahlungsquellen. An der Spitze der bis zu 30 cm auszufahrenden Strahlerstange ist eine Cäsium-137-Gammaquelle mit einer Aktivität von $2,96 \cdot 10^8$ Bequerel (8 mCi) angeordnet. Die Neutronenquelle, Americum-241-Beryllium mit einer Aktivität von $1,48 \cdot 10^9$ Bequerel (40 mCi), ist ortsfest am Sondenboden angeordnet. Die Halbwertszeiten für die Strahler sind 30,2 Jahre für den Gammastrahler und 432 Jahre für den Neutronenstrahler. Zur Detektion der Gammastrahlung sind zwei Geiger-Müller-Zählrohre eingebaut. Die Dichte der thermischen Neutronen wird mit dem Helium-3-Detektor bestimmt.

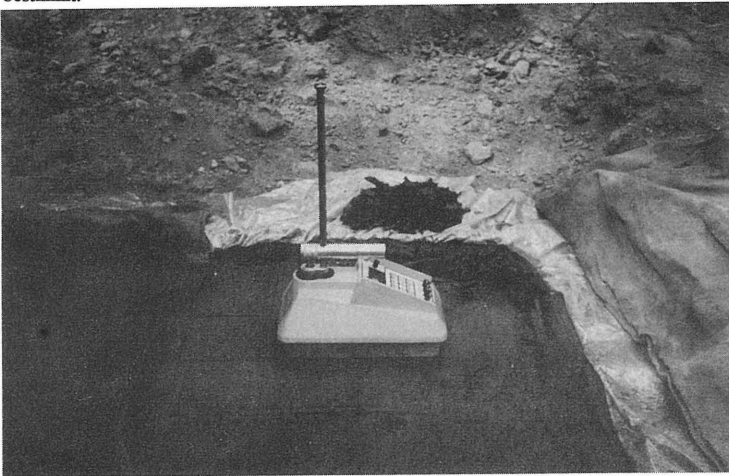


Bild 64: Kombinierte Aufsetz- und Einstichsonde Typ 3411 B der Firma TROXLER Electronics

Wie in Abschnitt 5 erläutert, wird mit dem radiometrischen Verfahren durch die Gammastrahlung die Gesamtdichte bestimmt. Bodenmechanisch entspricht dies der Feuchtdichte ρ_{rad} . Durch die Neutronenstrahlung wird die volumenbezogene Wassermasse m_{wrad} bestimmt. Die bodenmechanischen Kennwerte Wassergehalt w_{rad} und Trockendichte ρ_{drad} ergeben sich rechnerisch aus den Beziehungen

$$w_{\text{rad}} = \frac{m_{\text{wrad}}}{\rho_{\text{rad}} - m_{\text{wrad}}}$$

$$\rho_{\text{drad}} = \frac{\rho_{\text{rad}}}{1 + w_{\text{rad}}}$$

mit

ρ_{rad}	= Feuchtdichte	[kg/m ³]
ρ_{drad}	= Trockendichte	[kg/m ³]
w_{rad}	= Wassergehalt	[-]
m_{wrad}	= Wassermasse	[kg]

Zur Vereinfachung der Bedienung ist in die radiometrische Sonde ein Mikroprozessor integriert, der sowohl die Umwandlung der Zählraten in Meßwerte als auch die oben beschriebene Berechnung der bodenmechanischen Kennwerte vornimmt. Dazu sind auch die zuletzt ermittelten Standardzählwerte gespeichert. Der Aktivitätsverlust der radioaktiven Strahler zwischen zwei Kalibrierungen wird bei der Berechnung der Kennwerte berücksichtigt. Der Mikroprozessor steuert auch die Meßzeiten und berücksichtigt die entsprechend unterschiedlichen Zählraten bei der Berechnung der Dichtewerte. Drei verschiedene Meßzeiten, 15 Sekunden, 1 Minute und 4 Minuten, sind vorgesehen.

Wie schon mehrfach beschrieben, ist der Neutronenstrahler zur Bestimmung der Feuchte im Sondenboden fest eingebaut, so daß auch bei Verwendung der Sonde als Einstichsonde die Feuchte immer nur von der Oberfläche bestimmt wird. Für die Bestimmung der Feuchte ist deshalb die Reichweite oder die erfaßte Meßtiefe von besonderer Bedeutung. Nach den phy-

sikalischen Grundlagen hängt die Tiefenwirkung zudem noch vom Wassergehalt im Boden ab. Nach Herstellerangaben kann das erfaßte Meßvolumen annähernd als Halbkugel unter dem Sondenboden mit dem Radius r beschrieben werden:

$$r = 280 - 0,27 \cdot m_w \quad [\text{mm}]$$

$$\begin{aligned} \text{mit} \quad r &= \text{Meßtiefe} & [\text{mm}] \\ m_w &= \text{Wassermasse} & [\text{kg/m}^3] \end{aligned}$$

Bei der Verwendung der Sonde als Einstichsonde kann die Strahlerstange in Stufen von 2" (5 cm) abgesenkt werden. Die sich dadurch verändernden geometrischen Randbedingungen werden bei der Berechnung der Dichtewerte ebenfalls vom Mikroprozessor unmittelbar berücksichtigt.

6.4.2.2 Kalibrierverfahren

Radiometrische Sonden sind üblicherweise werksseitig kalibriert. Die hier verwendete Sonde wurde jährlich rekaliert. Zur Kalibrierung des Gammastrahlers werden nach Werksangaben je ein Block aus Magnesium, Aluminium und einer Legierung aus Aluminium/Magnesium verwendet. Zur Kalibrierung des Neutronenstrahlers wird ein Polyethylenblock sowie ein geschichteter Block aus Polyethylen/Magnesium verwendet.

Der Kalibrierbereich der verwendeten radiometrischen Sonde TROXLER 3411 B beträgt nach Herstellerangaben:

$$\begin{aligned} \text{Dichte:} & \quad 1.120 - 2.720 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Feuchte:} & \quad 0 - 640 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Zu Beginn eines jeden Tages der Arbeit mit der Sonde ist ein Eichtest vorgeschrieben. Dazu wird auf dem mitgelieferten Standardblock aus Polyethylen die sogenannten Standardwerte genommen. Der Strahler bleibt dabei eingefahren und vollständig abgeschirmt. Die Standard-

werte sind zu protokollieren. Diese täglichen Zählungen sind ein Maß für die Stabilität der Sonde. Die Standardwerte sind dem Aktivitätsverlust direkt proportional. Bild 65 zeigt den Vergleich der im Untersuchungszeitraum gemessenen Standardwerte des Gamma-Strahlers mit dem theoretischen Aktivitätsverlust. Es ist zu erkennen, daß die gemessenen Werte nur unwesentlich vom Rechenwert abweichen. Die Standardwerte des Neutronenstrahlers sind nicht dargestellt, weil die große Halbwertszeit keine meßbaren Unterschiede im Untersuchungszeitraum erkennen läßt. Der täglich aufgenommene Wert bleibt, solange die Sonde eingeschaltet ist, im Mikroprozessor gespeichert.

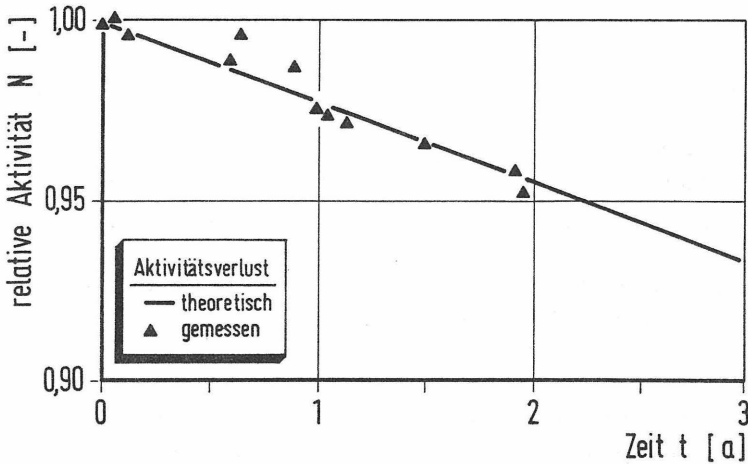


Bild 65: Gemessener und theoretischer Aktivitätsverlust des Gamma-Strahlers im Untersuchungszeitraum

Vom Hersteller der Sonde werden Angaben zur Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse gemacht, die in Bild 66 zusammengestellt sind. Diese Werte werden als *zu erwartende Fehler bei 95 % Wahrscheinlichkeit* bezeichnet. Es ist wohl davon auszugehen, daß diese Angaben der doppelten Standardabweichung der Meßwerte entsprechen.

Fehler	Dim.	Meßzeit		
		15s	1 min	4 min
Dichte mit Aufsetzsonde bei 2.000 kg/m ³	%	3,12	2,72	2,64
Dichte mit Einstichsonde bei 2.000 kg/m ³	%	1,44	1,28	1,20
Feuchte bei 250 kg/m ³	%	9,60	5,76	4,48

Bild 66: Herstellerangaben über zu erwartende Fehler bei der Messung mit der radiometrischen Sonde TROXLER 3411 B

Um diese Herstellerangaben zu überprüfen, wurden Tests zur Reproduzierbarkeit der Messungen mit der verwendeten Sonde ausgeführt. Dazu wurden zunächst je 33 Meßwerte der Zählrate des Gamma-Detektors und des Neutronen-Detektors auf einem Standardblock aus Polyethylen in unmittelbarer Folge aufgenommen. Die Strahlerstange verblieb dabei in arretierter Stellung, die Strahlung erreicht den Detektor als Direktstrahlung durch ein Fenster im Abschirmblock. Als Meßzeit wurden alle wählbaren Zeiten von 15 Sekunden, 1 Minute und 4 Minuten gewählt. Ansonsten wurden die Regeln zur Bestimmung der täglichen Bezugsstandards beachtet. Diese Messungen geben eine Übersicht über die Streuung der Meßwerte

durch die Zufälligkeiten des radioaktiven Zerfalls und der Genauigkeit der Detektoren. Bild 67 zeigt die ermittelten Häufigkeitsverteilungen für den Gamma-Detektor, Bild 68 zeigt die Ergebnisse für den Neutronen-Detektor.

In einem weiteren Untersuchungsschritt wurde die Schirmung der Strahlerstange ausgelöst und die Sonde auf dem Standardblock als Aufsetzsonde eingesetzt. Hier wurden je 50 Meßwerte der Zählrate des Gamma-Detektors und des Neutronendetektors für alle Meßzeiten aufgenommen. Die Ergebnisse zeigen die unter Kalibrierbedingungen zu erwartenden Fehler. Die angegebenen Werte für die volumenbezogene Wassermasse entsprechen dem über den Wasserstoffanteil im Wassermolekül umgerechneten Wasserstoffanteil im Polyethylen. Wegen des hohen Wasserstoffgehalts im Polyethylen kommt es zu den zunächst unsinnig erscheinenden Angaben über die Wassermasse. Die Bilder 68 und 69 zeigen die Häufigkeitsverteilungen der jeweils 50 Meßwerte für die verschiedenen Meßzeiten. Dabei werden die Herstellerangaben (siehe Bild 66) und die Angaben aus dem Schrifttum (siehe Bild 31) grundsätzlich bestätigt, nach denen die Standardabweichung der Messwerte mit zunehmender Meßzeit immer geringer werden.

In Bild 71 sind die sich aus den Versuchen ergebenden zu erwartenden Fehler zusammengestellt. Analog zu den bisherigen Darstellungen entsprechen die prozentualen Fehlerangaben der doppelten Standardabweichung. Beim Vergleich der mit Sonde gefundenen Meßwerte mit den Herstellerangaben (Bild 66) zeigt sich, daß zumindest unter Kalibrierbedingungen eine deutlich bessere Reproduzierbarkeit erreicht werden kann.

Seitens des Herstellers sind detaillierte Stabilitäts- und Drifttests vorgeschlagen, die versuchsbegleitend ständig ausgeführt wurden und zu Ergebnissen führten, die immer innerhalb der vom Hersteller angegebenen Grenzen lagen. Die technische und statistische Grundlage dieser Tests ist ähnlich den eigenen durchgeführten Versuche. Auf ihre Darstellung wird deshalb verzichtet.

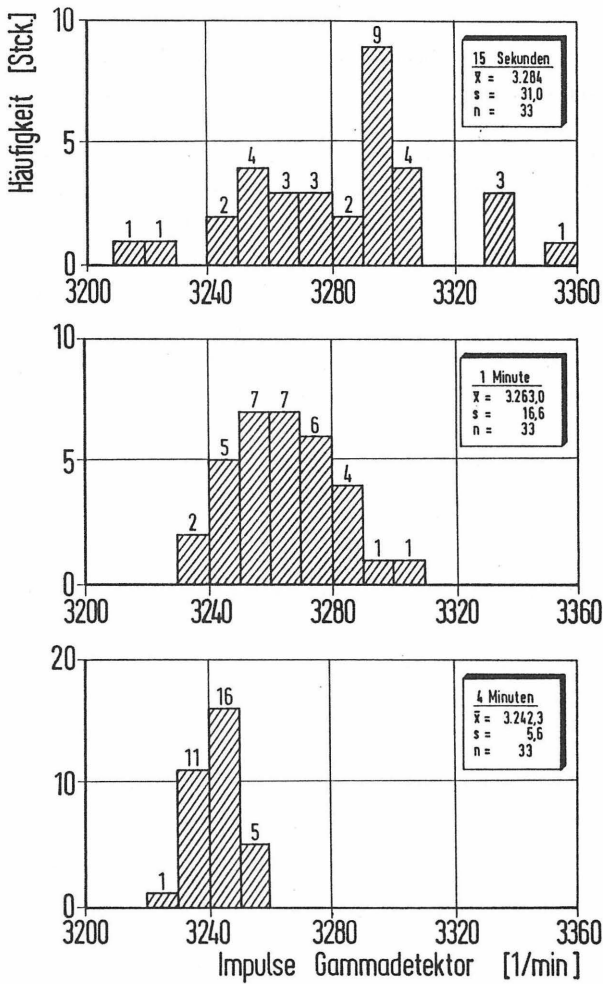


Bild 67: Häufigkeitsverteilung der mit dem Gamma-Detektor gemessenen Zählraten für verschiedene Meßzeiten auf dem Standardblock

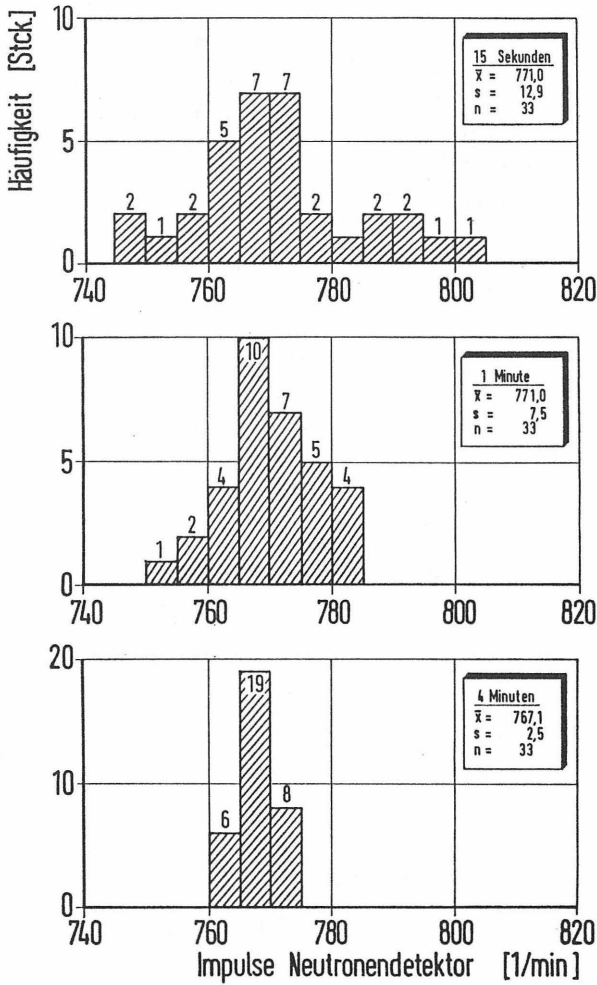


Bild 68: Häufigkeitsverteilung der mit dem Neutronen-Detektor gemessenen Zählraten für verschiedene Meßzeiten auf dem Standardblock

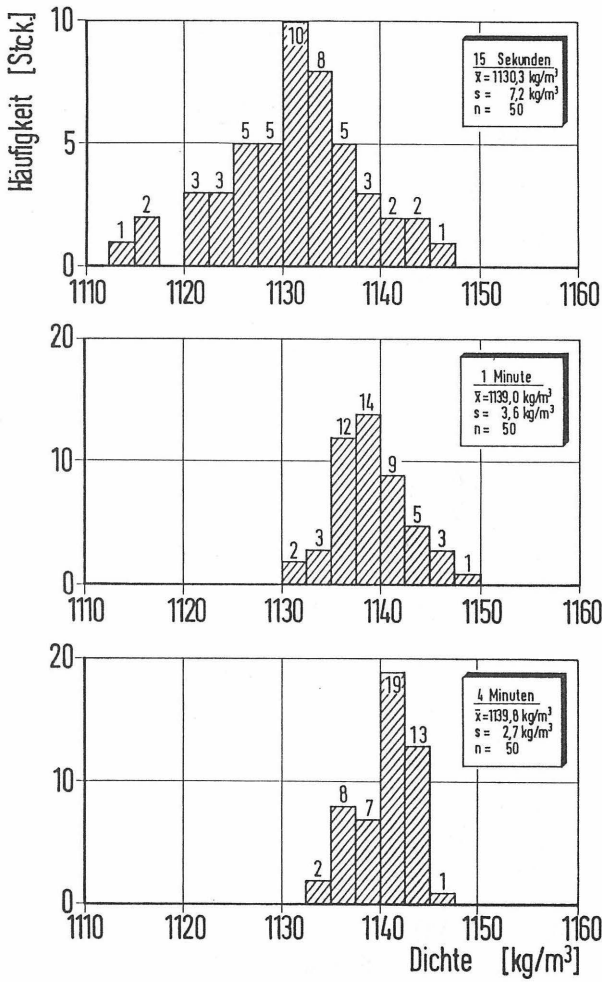


Bild 69: Häufigkeitsverteilung der gemessenen Dichten des Standardblocks für verschiedene Meßzeiten

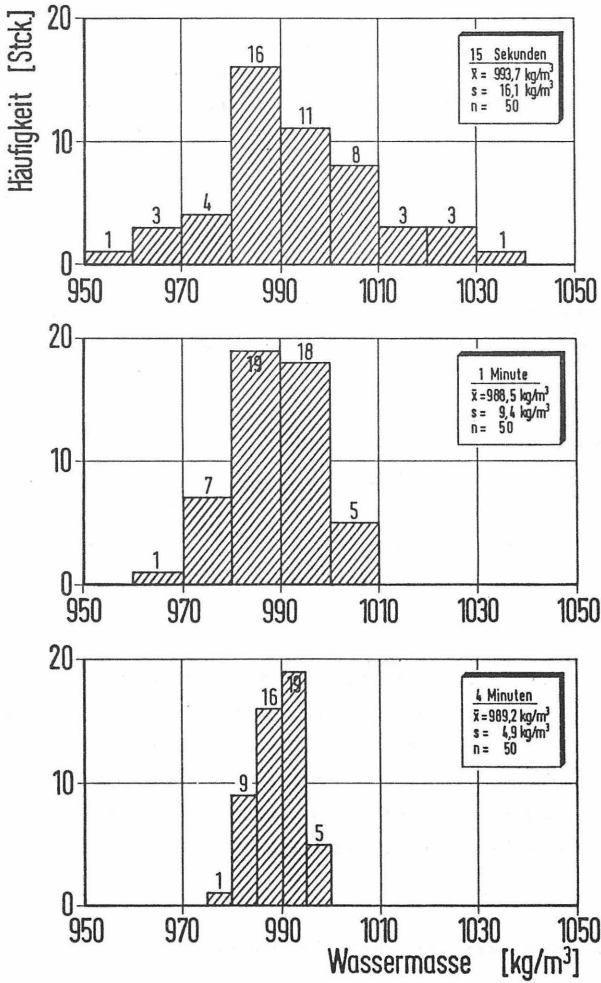


Bild 70: Häufigkeitsverteilung der gemessenen "Wassermassen" des Standardblocks für verschiedene Meßzeiten

Fehler	Dim.	Meßzeit		
		15 s	1 min	4 min
Zählrate Gamma	%	1,89	1,02	0,34
Zählrate Neutronen	%	3,35	1,95	0,65
Dichte mit Aufsetzsonde bei 1.200 kg/m ³	%	1,27	0,63	0,47
"Feuchte" bei Polyethylen	%	3,24	1,91	0,99

Bild 71: Zusammenstellung der unter Kalibrierbedingungen gefundenen relativen mittleren Fehler

Aufgrund der in den Bildern 65 bis 71 zusammengestellten Werte wurde bei allen folgenden Versuchen eine Meßzeit von 1 min eingehalten. Diese Meßzeit erscheint als vertretbarer Kompromiß zwischen der Genauigkeit und der erforderlichen Versuchszeit. Zur Verringerung des Einflusses zufälliger Extremwerte wurde jede Messung dreimal wiederholt und der Mittelwert als Meßwert angegeben. Wenn für besondere Untersuchungen von diesem Vorgehen abgewichen wurde, wird der geänderte Meßvorgang beschrieben.

6.4.3 Versuchsanordnungen für das radiometrische Verfahren

Zur Untersuchung der Genauigkeit der radiometrischen Sonde bei der Dichtebestimmung wurde zunächst ein Betonblock auf einem Parkplatz des Instituts hergestellt. Bild 72 zeigt diesen Block. Die erforderliche Betonmenge wurde in einer Charge hergestellt und mit großem

Aufwand sorgfältig verdichtet. Dadurch sollte ein homogener Körper entstehen. Die Untersuchung eines kurz vor Beginn der Grunduntersuchungen entnommenen Bohrkerns hat bestätigt, daß der Bohrkern über seine gesamte Länge im Rahmen der Meßgenauigkeit der Dichtebestimmung durch Tauchwägung homogen war. Das Bohrloch wurde wieder mit einer Betonmischung vergossen, um Störungen der radioaktiven Strahlung zu minimieren. Auch Messungen an den beiden in Bild 72 markierten Positionen I und II haben keine signifikanten Inhomogenitäten des Betonblocks erkennen lassen.



Bild 72: Untersuchungen mit dem radiometrischen Verfahren an einem Betonblock (Ansicht und Lageskizze)

Analog zum Einstichverfahren bei Böden wurden im Betonblock zwei Bohrungen mit einem Durchmesser von 26 mm und einer Tiefe von 32 cm hergestellt (Bild 72). Der Erdnagel, der zur Herstellung von Einstichlöchern in Böden benutzt wird, hat den gleichen Durchmesser, die Strahlerstange hat einen Durchmesser von 16 mm.

Weitere Untersuchungen wurden auf einem Versuchsfeld ausgeführt. Dazu wurde der Oberboden bis etwa 50 cm Tiefe auf eine Fläche von 2 x 3 m ausgehoben. Die entstandene Grube

wurde schichtweise mit Tonziegeln weicher Konsistenz ausgelegt. Üblicherweise werden die Tonziegel, die etwa eine Größe von 10 x 27 x 31 cm haben, als Teichbauelemente zur Abdichtung von Garten- und Zierteichen eingesetzt. Die Fugen der Tonziegel wurden mit einem Handverdichtungsgerät zugestampft. Die Tonziegel werden mit einer Strangpresse aus homogenisiertem, aufbereitetem Ton mit hohem Rohtongehalt hergestellt. Das Grundmaterial entspricht dem, das für den Ringversuch für die Wassergehaltsbestimmung im Mikrowellenherd verwendet wurde (Abschnitt 6.3.2.2). Bild 73 zeigt die Herstellung des Versuchsfeldes.

In einem weiteren Schritt konnten Untersuchungen verwendet werden, die im Rahmen eines Ringversuchs der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) in Bergisch-Gladbach gewonnen wurden. Von der BAST wurden in überdachten Hallen große Probefelder sandigen Schluffs hergestellt, die in Probeflächen von 50 x 50 cm² eingeteilt wurden. Nach einem festgelegten Schema wurden diese Probeflächen verschiedenen Prüfinstituten zugeteilt. Auf jeder Probefläche sollte eine Dichtebestimmung mit dem Ausstechzylinderverfahren, dem Sandersatzverfahren, dem Ballongerät und dem radiometrischen Verfahren durchgeführt werden. Die Ergebnisse der 22 Probeflächen, die dem Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig zugeteilt wurden, konnten für eigene Untersuchungen verwendet werden. Bild 74 zeigt einen Ausschnitt der Arbeiten.



Bild 73: Herstellung eines Versuchsfeldes aus homogenisierten Tonziegeln

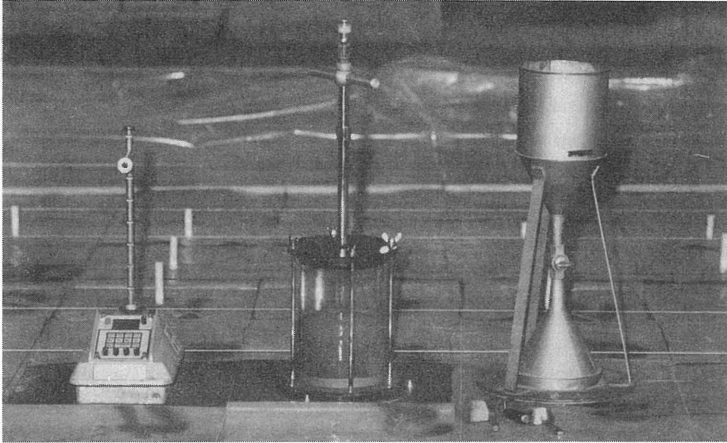


Bild 74: Radiometrische Sonde, Ballongerät und Sandersatzgerät beim Einsatz auf den zugeteilten Probeflächen

Die bodenmechanischen Eigenschaften der beiden verwendeten Böden sind in den beiden letzten Spalten des Bildes 57 zusammengestellt.

6.4.4 Bestimmung der Dichte

6.4.4.1 Einfluß der Meßtiefe

An den beiden Versuchsanordnungen Betonblock und Versuchsfeld Ton, bei denen näherungsweise homogener Aufbau vorausgesetzt werden konnte, wurden Untersuchungen zum Einfluß der Meßtiefe auf das Ergebnis ausgeführt. Bei den Messungen nach dem radiometrischen Verfahren wurde dabei zunächst die Messungen nach der Rückstrahlmethode (Aufsetzsonde) und der Durchstrahlmethode (Einstichsonde) unterschieden.

Der Betonkern wurde in 3 Stücke zu je 10 cm zersägt, an denen jeweils einzeln die Dichtewerte bestimmt wurden. Die Dichtewerte nach dem radiometrischen Meßverfahren wurden nach der Rückstrahlmethode von der Oberfläche und in 6 Tiefenstufen nach der Durchstrahlmethode ausgeführt. Die radiometrische Sonde wurde dabei in jeweils 6 Positionen entsprechend Bild 72 aufgestellt. Bild 75 zeigt die Ergebnisse, die sich aus den Mittelwerten der Dreifach-Bestimmung an allen Positionen ergeben.

Dabei fällt zunächst auf, daß die Dichte des Betons nach unten zunimmt und nicht wie erwartet homogen ist. In den oberen 20 cm entsprechen die Meßwerte des radiometrischen Verfahrens und der des Betonkerns bis auf geringe Abweichungen. Im unteren Drittel ist die Dichte des Betonkerns signifikant größer als nach dem radiometrischen Verfahren. Dies ist jedoch nur scheinbar ein Meßfehler, vielmehr entspricht ein Meßwert nach der Durchstrahlmethode der durchschnittlichen Dichte über das gesamte Meßvolumen zwischen der Oberfläche und der Einstichtiefe.

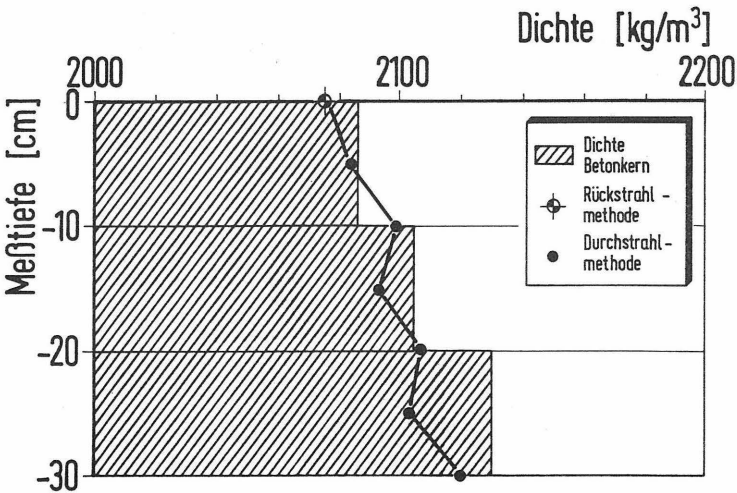


Bild 75: Ergebnisse der Bestimmung der Dichte am Betonkern und mit dem radiometrischen Verfahren über die Einstichtiefe

An dieser Stelle soll noch einmal exemplarisch die Reproduzierbarkeit der Messungen gezeigt werden. Beispielhaft für die Einstichtiefe -30 cm wurden die je 3 Meßwerte auf allen 6 Meßpositionen für die 3 Meßzeiten 15 Sekunden, 1 Minute und 4 Minuten aufgenommen. Bild 76 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Meßwerte der Meßzeit 1 Minute sowie die Mittelwerte und Standardabweichungen aller Meßzeiten. Dabei wird noch einmal deutlich, daß Meßzeiten von mindestens einer Minute gewählt werden sollten. Bei der Bewertung der Meßergebnisse muß noch berücksichtigt werden, daß hier 6 Aufstellungspositionen der radiometrischen Sonde mit entsprechenden geringen Inhomogenitäten des Betonblocks enthalten sind.

Weder beim Vergleich der Dichtebestimmung am Bohrkern mit dem radiometrischen Verfahren noch bei weiteren statistischen Auswertungen der aufgenommenen Werte konnten Besonderheiten der Rückstrahlmethode gegenüber der Durchstrahlmethode nachgewiesen werden.

Einstichtiefe 30 cm		
Meßzeit	Mittelwert	Standard- abweichung
t	x	s
[min]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
0,25	2.118	25,7
1	2.120	12,0
4	2.119	9,1

Bild 76: Statistische Angaben zu den Meßwerten einer Meßtiefe am Betonblock

Weitere Untersuchungen zum Einfluß der Meßtiefe wurden am Versuchsfeld Ton durchgeführt. Zur Bestimmung der Dichte mit konventionellen Verfahren über die Tiefe wurden 3

kleine Ausstechzylinder in jeder Meßtiefe mit einem Volumen von je 20 cm^3 verwendet. Für den für das Versuchsfeld verwendeten aufbereiteten Ton haben Vorversuche ergeben, daß mit den Zylindern eine ausreichende Meßgenauigkeit zu erreichen ist. Bei der Auswertung der Ergebnisse (Bild 77) zeigt sich sowohl für den Ausstechzylinder als auch für das radiometrische Verfahren eine signifikante Erhöhung der Dichte im oberflächennahen Bereich, vermutlich durch die Verdichtung. Darunter sind die Meßwertunterschiede jedes Verfahrens gering. Es ist jedoch eine systematische Abweichung zwischen den Meßwerten beider Verfahren zu erkennen. Betrachtet man die Mittelwerte beider Verfahren jeweils ab -5 cm (1.967 kg/m^3 für das radiometrische Verfahren und 1.947 kg/m^3 für den Ausstechzylinder), so ergibt sich ein systematischer Fehler von 20 kg/m^3 . Der zufällige Fehler, ausgedrückt als die Abweichungen eines Verfahrens über die Tiefe, ist demgegenüber gering.

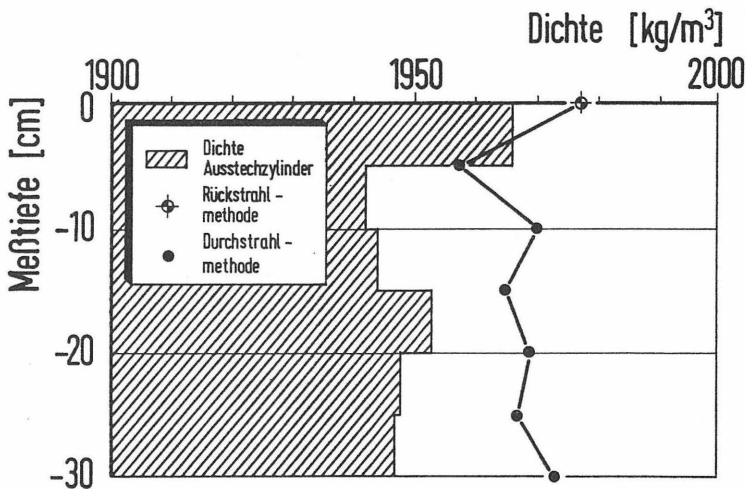


Bild 77: Ergebnisse der Bestimmung der Dichte mit dem Ausstechzylinder und mit dem radiometrischen Verfahren über die Einstichtiefe

Signifikante Unterschiede zwischen der Rückstrahlmethode und der Durchstrahlmethode wurden nicht beobachtet. Der höhere Wert nach der Rückstrahlmethode gegenüber den anderen Werten ist wohl auf eine durch Verdichtung an der Oberfläche erhöhte Dichte zurückzuführen.

Auch bei Messungen mit der Einstichsonde (Durchstrahlverfahren) ist zu beachten, daß zwischen dem Strahler und dem zu bestimmenden Medium kein Luftspalt verbleibt (siehe hierzu Abschnitt 5.4.2.5). Um den hieraus zu erwartenden Meßfehler abzuschätzen, wurde noch einmal der Betonblock genutzt. Das in den Block gebohrte Loch für die Strahlerstange hat einen Durchmesser von 26 mm, die Strahlerstange einen Durchmesser von 16 mm. Über die Meßtiefe wurden zwei Meßreihen aufgenommen, bei denen einmal die Strahlerstange an die Lochwandung, die dem Detektor am nächsten liegt, angezogen wurde. In der zweiten Meßreihe wurde die Strahlerstange an die vom Detektor abgewandte Seite der Lochwandung gedrückt. Das Ergebnis dieser Messungen zeigt Bild 78. Oberflächennah wurde dabei ein

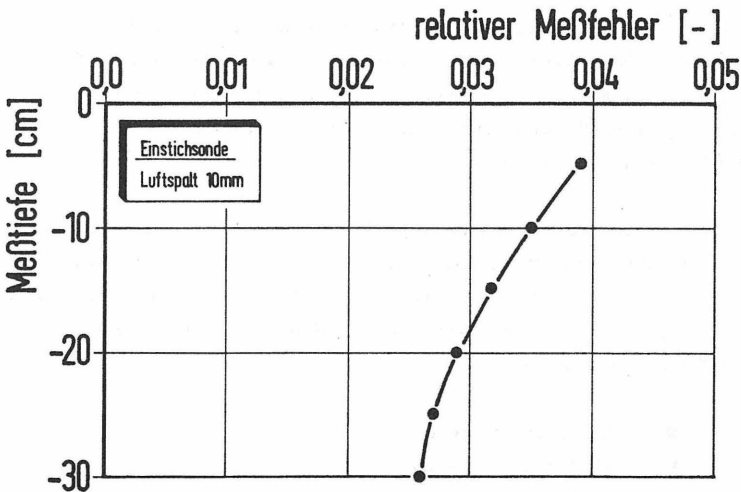


Bild 78: Relativer Meßfehler für einen Luftspalt von 10 mm zwischen Strahlerstange und Lochwandung

relativer Meßfehler von 0,039 beobachtet, der mit zunehmender Einstichtiefe zurückgeht. Aber auch bei einer Einstichtiefe von -30 cm ist noch mit einem relativen Fehler von 0,024 zu rechnen. Für alle folgenden Messungen mit der Einstichsonde wurde deshalb darauf geachtet, daß die Strahlerstange jeweils nach vorn an die Lochwandung angezogen wurde.

Die Versuche zur Bestimmung des Einflusses der Meßtiefe des radiometrischen Verfahren haben ergeben, daß Versuche nach der Durchstrahlmethode die mittlere Dichte über das durchstrahlte Meßvolumen wiedergeben. Die Rückstrahlmethode ermöglicht die Messung der Dichte im oberflächennahen Bereich. Bei Messungen auf einem Versuchsfeld aus Ton wurde eine systematische Abweichung zwischen dem Ausstechzylinderverfahren und dem radiometrischen Verfahren festgestellt.

6.4.4.2 Einfluß der Oberfläche

Aus den Untersuchungen mit dem radiometrischen Verfahren im bituminösen Straßenbau ist bekannt, daß die Qualität der Oberfläche einen entscheidenden Einfluß auf das Meßergebnis hat. Für den Einsatz bei der Güteüberwachung mineralischer Basisabdichtungen war zu untersuchen, ob dieser Oberflächeneinfluß auch bei Versuchen an Böden und nach der Durchstrahlmethode zu beobachten ist.

Auf dem Versuchsfeld Ton wurden in einigen Meßstellen Versuche nach der Rückstrahlmethode durchgeführt, da hier die größten Fehlermöglichkeiten erwartet wurden. Es wurden vier verschiedene Methoden der Oberflächenbehandlung untersucht und mit den Ergebnissen kleiner, bis -5 cm Tiefe entnommener Ausstechzylinder verglichen. Die Methoden der Oberflächenbehandlung waren:

- ungeglättete Oberfläche
- mit Quarzmehl abgestreut
- mit Zement abgestreut
- geglättete Oberfläche

Bei den Verfahren des Abstreuens der Oberfläche wurden etwa 5 mm Material aufgebracht und mit der Bodenplatte der radiometrischen Sonde geglättet und leicht verdichtet. Nach jeder Methode wurden Versuche an fünf Probestellen durchgeführt. Bild 79 zeigt die Mittelwerte der Ergebnisse.

Bei der Auswertung der Ergebnisse zeigt sich, eine ungeglättete Oberfläche zu erheblich geringeren Dichten führt. Auch ein Ausgleich dieser Unebenheiten durch Zementmehl oder Quarzmehl verbessert das Ergebnis zwar, ergibt aber noch immer signifikant geringere Dich-

Methode	Dichte	
	[kg/m ³]	[%]
konventionell Ausstechzylinder	1.962	100,0
radiometrisch ungeglättet	1.882	95,9
Quarzmehl	1.946	99,2
Zement	1.917	97,7
geglättet	1.966	100,2

Bild 79: Bestimmung der Dichte nach dem Ausstechzylinder und der Rückstrahlmethode für verschiedene Oberflächenbehandlung

ten. Den besten Erfolg erreicht man mit einer Glättung der Oberfläche. Dabei darf jedoch nicht außer Acht gelassen werden, daß für das Versuchsfeld ein ausgeprägt plastischer Ton verwendet wurde.

Eine Glättung der Oberfläche wie in diesem Fall wird nicht immer möglich sein. Für alle weiteren Versuche wurde deshalb die Oberfläche so weit als irgend möglich geglättet. Lediglich trotzdem verbleibende Unebenheiten, die aus der Kornverteilung des Materials rühren, wurden durch Quarzmehl ausgeglichen.

Ebenfalls am Versuchsfeld Ton wurde der Einfluß der Oberfläche auf die Durchstrahlmethode untersucht. Dazu wurden auf einer zunächst geglätteten Oberfläche Hohlräume definierter Größe hergestellt, um zu signifikanten Werten kommen. Verschiedene rechteckige Stahlprofile von je 6 mm Breite und Tiefen von 1,5 mm, 3 mm und 6 mm wurden dazu in die Oberfläche eingedrückt. Bezogen auf eine Grundfläche der radiometrischen Sonde von $36 \times 23 \text{ cm}^2$ wurden so Hohlräume in der Oberfläche von bis zu 85 cm^3 erzeugt. Dieser Hohlraumgehalt erscheint ausreichend, um insgesamt denkbare Unebenheiten der Oberfläche zu erfassen. Er entspräche einem gleichmäßigen Luftspalt unter dem Sondenboden von über einem Millimeter. Zusätzlich wurde noch zwischen einer Anordnung der über die gesamte Länge oder Breite der Sonde reichenden Fehlstellen längs und quer zur Hauptstrahlungsrichtung unterschieden.

Bild 80 zeigt beispielhaft die Ergebnisse für die Hohlräume, die quer zur Durchstrahlungsrichtung angeordnet waren. Die in der Darstellung berücksichtigten Meßtiefen von -10 cm und -20 cm wurden mit der Einstichsonde (Durchstrahlmethode) bestimmt, an der Oberfläche wurde die Aufsetzsonde (Rückstrahlmethode) verwendet.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist der Einfluß des zusätzlichen Hohlraums bei der Rückstrahlmethode deutlich zu erkennen. Für die größten Hohlraumgehalte sind Meßfehler von bis zu 4 % zu beobachten. Dieser Einfluß geht bei Untersuchungen nach der Durchstrahlmethode stark zurück und ist nur noch bei einer Einstichtiefe von -10 cm und dem größten Hohlraumgehalt signifikant.

Trotz des nur geringen Einflusses von Fehlstellen in der Oberfläche wurden die bereits beschriebenen Maßnahmen zur Glättung der Oberfläche weiterhin durchgeführt. Sie sind auch für die Routinemessungen in der Praxis dringend zu empfehlen.

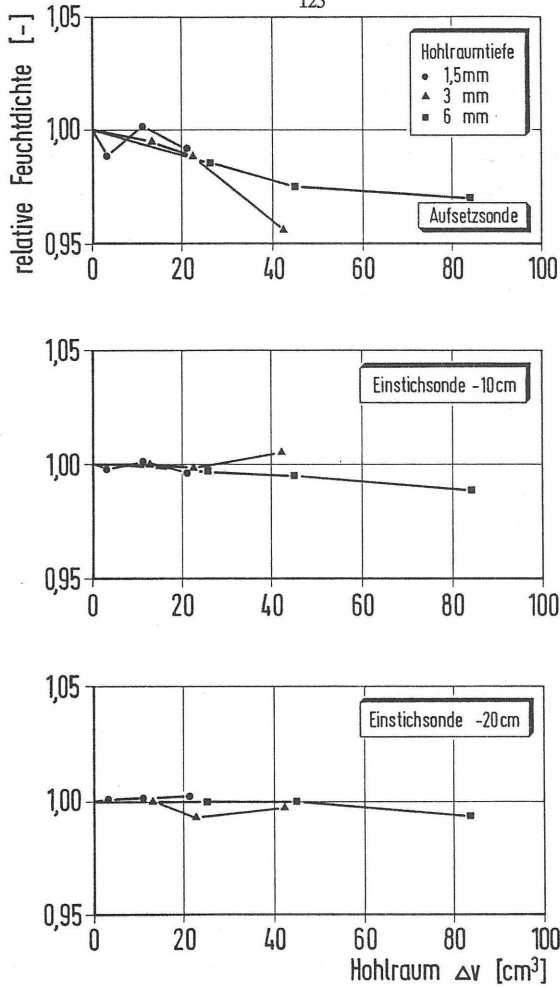


Bild 80: Meßabweichungen für die Dichtebestimmung nach der Rückstrahl- und Durchstrahlungsmethode in Abhängigkeit von der Meßtiefe und dem Hohlraumgehalt der Oberfläche (Hohlräume quer zur Durchstrahlungsrichtung)

6.4.4.3 Vergleich mit anderen Versuchstypen

Die Untersuchungen am Probefeld der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) wurden dazu genutzt, einen Vergleich des radiometrischen Verfahrens mit verschiedenen genormten Verfahren durchzuführen.

Der Versuchsablauf auf dem Probefeld war wie folgt:

- Durchführung der radiometrischen Messung im vorbereiteten Einstichloch bei einer Einstichtiefe von -20 cm
- Einschlagen und Ausgraben eines Ausstechzylinders, wobei der beim Ausgraben gehobene Boden sofort gesondert gesammelt wurde, Bestimmung der Dichte durch Wägung und des Wassergehaltes durch Ofentrocknung und Mikrowellenherd
- Herstellen eines Loches für das Ballonverfahren im bereits für den Ausstechzylinder hinterlassenen Loch, Zuschlag des gehobenen Bodens zu dem vorher gesammelten Boden, rechnerischer Zuschlag der Feuchtmasse aus dem Ausstechzylinder, Volumenbestimmung mit dem Ballongerät
- Volumenbestimmung im gleichen Loch nach dem Sandersatzverfahren

Bild 81 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der 22 Untersuchungsergebnisse jedes Verfahrens. Es ist zu erkennen, daß der Mittelwert des radiometrischen Verfahrens mit $\rho_{\text{rad}} = 1.997 \text{ kg/m}^3$ im Streubereich der Mittelwerte der anderen Verfahren liegt. Dabei fällt auf, daß der Mittelwert für das Ausstechzylinderverfahren mit $\rho = 2.007 \text{ kg/m}^3$ am höchsten liegt. Dies dürfte auf Verdichtungsvorgänge beim Einschlagen des Ausstechzylinders zurückzuführen sein.

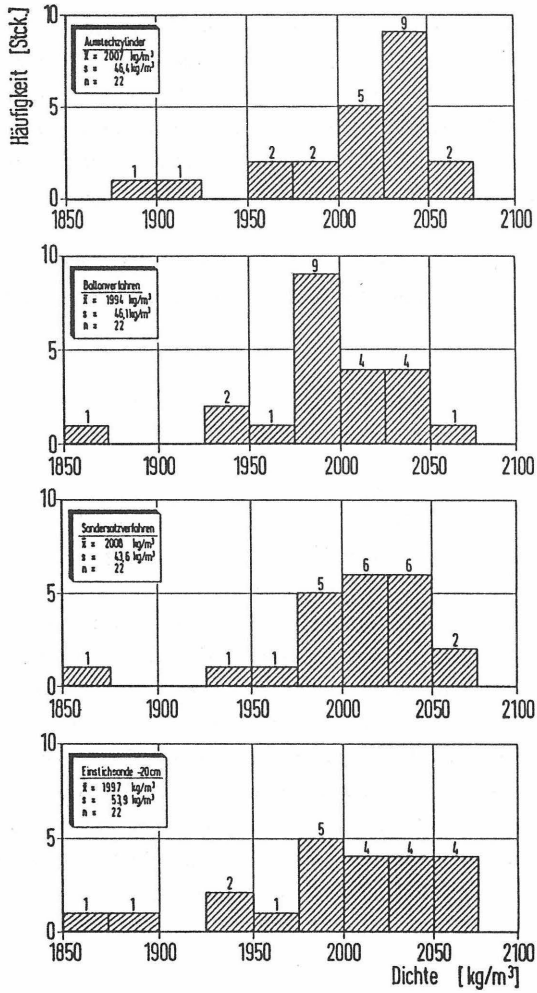


Bild 81: Häufigkeitsverteilungen für die Dichtebestimmung nach vier Verfahren auf einem Probefeld

Um einen Überblick über die Reproduzierbarkeit der Dichtebestimmung an einem Einzelpunkt zu erhalten, sind in Bild 82 die Versuchsergebnisse jeweils in Bezug zum jeweiligen Ergebnis des Ausstechzylinderverfahrens dargestellt. Das Ausstechzylinderverfahren wurde gewählt, weil es für die Dichtebestimmung bei der Güteüberwachung mineralischer Basisabichtungen am gebräuchlichsten ist. Der Vergleich der ermittelten Korrelationskoeffizienten R zeigt, daß die lineare Regression eine ausreichende Bestimmtheit ergeben hat.

Die dargestellten Ergebnisse wurden weiter dahingehend ausgewertet, daß die Meßunsicherheiten f_i des jeweiligen Verfahrens in Bezug zum Ausstechzylinderverfahren ermittelt wurden.

$$f = \frac{\rho - \rho_{\text{rad}}}{\rho}$$

mit	f = Meßunsicherheit	[-]
	ρ = Feuchtdichte (Ausstechzylinder)	[kg/m ³]
	ρ_{rad} = Feuchtdichte (radiometrisch)	[kg/m ³]

Diese Berechnung wurde für alle untersuchten Verfahren, jeweils bezogen auf das Ausstechzylinderverfahren, durchgeführt. Die sich ergebenden Mittelwerte sowie die Standardabweichungen der Meßunsicherheiten sind in Bild 83 zusammengestellt. Alle sich ergebenden Mittelwerte haben ein positives Vorzeichen. Dies zeigt noch einmal den systematischen Fehler, der offensichtlich beim Ausstechzylinderverfahren zu suchen ist. Wie bereits bei der Darstellung der Häufigkeitsverteilungen der Einzelwerte der Dichtebestimmung liegt auch der zufällige Fehler, ausgedrückt durch die einfache Standardabweichung, für das radiometrische Verfahren im Bereich der genormten Verfahren. Die Vergleichbarkeit des radiometrischen Verfahrens mit genormten Verfahren ist dadurch nachgewiesen.

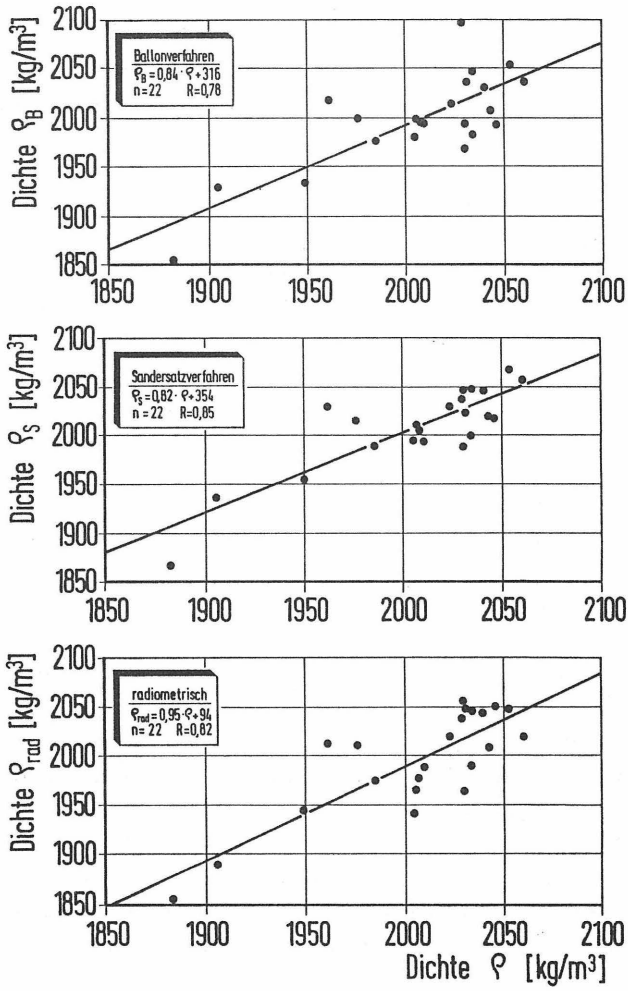


Bild 82: Ergebnisse der Dichtebestimmung nach verschiedenen Verfahren in Bezug zum Ausstechzylinderverfahren

Verfahren	Meßunsicherheit f	
	Mittelwert	Standardabweichung
	x [-]	s [-]
Sandersatz	0,0007	0,0124
Ballongerät	0,0049	0,0170
radiometrisch	0,0053	0,0148

Bild 83: Mittelwerte und Standardabweichungen der auf das Ausstechzylinderverfahren bezogenen Meßunsicherheiten verschiedener Verfahren der Dichtebestimmung

6.4.5 Bestimmung des Wassergehalts

6.4.5.1 Einfluß der Meßtiefe

Untersuchungen zum Einfluß der Meßtiefe auf die Bestimmung des Wassergehalts mit dem radiometrischen Verfahren im eigentlichen Sinn sind nicht möglich. Bei der verwendeten Sonde sind, wie bereits erwähnt, Strahlenquelle und Detektor ortsfest im Sondenboden eingebaut. Als Meßergebnis einer Wassergehaltsbestimmung wird in jedem Fall zunächst die Wassermasse je Volumeneinheit tiefenunabhängig ermittelt. Der Einflußtiefe der Messung ist dabei nur vom Wassergehalt abhängig. Zur Berechnung eines tiefenabhängigen Wassergehalts wird die tiefenunabhängig bestimmte Wassermasse lediglich rechnerisch auf die tiefenabhängig ermittelte Feuchtdichte bezogen. So ergeben sich rechnerisch scheinbar unterschiedliche Wassergehalte über die Tiefe durch Änderung der Feuchtdichte über die Tiefe.

6.4.5.2 Einfluß der Oberfläche

Bei den Untersuchungen mit dem radiometrischen Verfahren im bituminösen Straßenbau wird der Wassergehalt nicht bestimmt. Daher ist nicht bekannt, ob die Qualität der Oberfläche einen entscheidenden Einfluß auf das Meßergebnis hat. Für den Einsatz bei der Güteüberwachung mineralischer Basisabdichtungen war zu untersuchen, ob dieser Oberflächeneinfluß bei Versuchen an Böden zu beobachten ist.

Auf dem Versuchsfeld Ton wurden in einigen Meßstellen die schon beschriebenen Versuche mit vier verschiedenen Methoden der Oberflächenbehandlung durchgeführt und mit den Ergebnissen der Wassergehaltsbestimmung an kleinen, bis -5 cm Tiefe entnommenen Ausstechzylinder verglichen. Die Methoden der Oberflächenbehandlung waren:

- ungeglättete Oberfläche
- mit Quarzmehl abgestreut
- mit Zement abgestreut
- geglättete Oberfläche

Bild 84 zeigt die Mittelwerte der Ergebnisse, die Verdeutlichung des Einflusses als volumenbezogene Wassermasse angegeben werden.

Sogar die Untersuchungen bei geglätteter Oberfläche ergeben signifikant geringere Wassermassen. Dies deutet auf einen systematischen Fehler hin, der jedoch nicht weiter untersucht wurde. Beim Vergleich mit den drei anderen Verfahren der Oberflächenbehandlung zeigt sich jedoch, daß nur das Verfahren der Glättung der Oberfläche einigermaßen zuverlässige Meßwerte ermöglicht. Zur Bestimmung des Wassergehalts mit dem radiometrischen Verfahren sollte deshalb so weit als irgend möglich auf die Verwendung anderer, insbesondere trockener pulverförmiger Materialien verzichtet werden.

Am bereits beschriebenen Versuchsfeld Ton wurde der Einfluß der Oberfläche auf die Wassergehaltsbestimmung untersucht. Dazu wurden die ebenfalls bereits beschriebenen Versuche

mit Herstellung von Hohlräumen definierter Größe auf einer zunächst geglätteten Oberfläche genutzt.

Methode	Wassermasse	
	[kg/m ³]	[%]
konventionell Ausstechzylinder	430	100,0
radiometrisch ungeglättet	402	93,5
Quarzmehl	389	90,5
Zement	393	91,4
geglättet	419	97,4

Bild 84: Bestimmung der Wassermasse an Ausstechzylindern durch Ofentrocknung und mit dem radiometrischen Verfahren für verschiedene Oberflächenbehandlung

Bild 85 zeigt beispielhaft die Ergebnisse für die Hohlräume, die quer zur Durchstrahlungsrichtung angeordnet waren. Dabei ist aus den genannten Gründen kein Ergebnis über die Tiefe angegeben. Der eingesetzte Sondentyp wird deshalb als Aufsetzsonde bezeichnet. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist der Einfluß des zusätzlichen Hohlraums deutlich zu erkennen. Für die größten Hohlraumgehalte sind Meßfehler von bis zu 8 % zu beobachten. Dieser Einfluß ist bereits bei kleinen Hohlraumgehalten signifikant.

Wegen des großen Einflusses von Fehlstellen in der Oberfläche sind die bereits beschriebenen Maßnahmen zur Glättung der Oberfläche auch für die Routinemessungen in der Praxis dringend zu empfehlen.

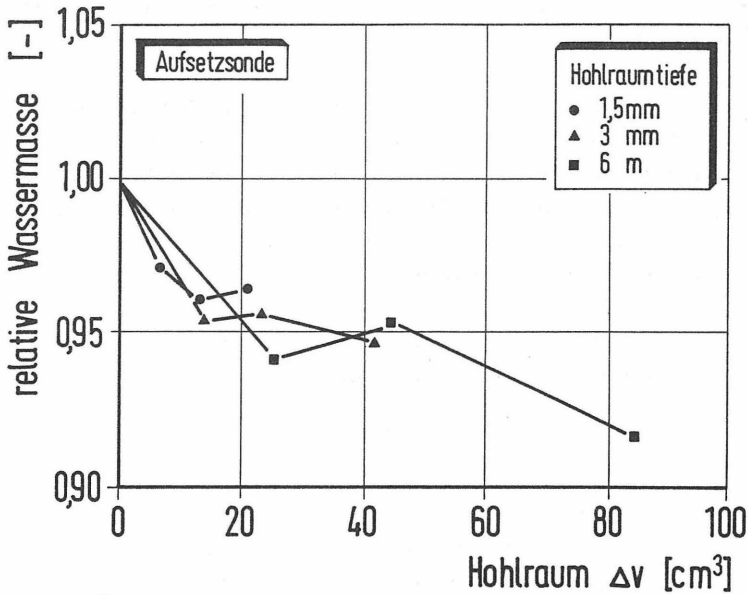


Bild 85: Meßabweichungen für die Bestimmung der Wassermasse in Abhängigkeit vom Hohlraumgehalt der Oberfläche (Hohlräume quer zur Durchstrahlungsrichtung)

6.4.5.3 Vergleich mit anderen Versuchstypen

Die Untersuchungen am Probefeld der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) wurden dazu genutzt, einen Vergleich des radiometrischen Verfahrens mit dem genormten Verfahren der Ofentrocknung und der Trocknung mit Mikrowellen durchzuführen. Der Versuchsablauf auf dem Probefeld wurde bereits beschrieben.

Bild 86 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der 22 Untersuchungsergebnisse jedes Verfahrens. Es ist zu erkennen, daß der Mittelwert des radiometrischen Verfahrens mit $w_{\text{rad}} = 0,1547$ der kleinste Wert aller Verfahren ist.

Um einen Überblick über die Reproduzierbarkeit der Wassergehaltsbestimmung an einem Einzelpunkt zu erhalten, sind in Bild 87 die Versuchsergebnisse jeweils in Bezug zum jeweiligen Ergebnis der Ofentrocknung dargestellt. Der Vergleich der ermittelten Korrelationskoeffizienten R zeigt, daß die lineare Regression gerade noch ausreichende Bestimmtheit ergeben hat. Dabei fällt auf, daß das radiometrische Verfahren einen deutlich geringeren Korrelationskoeffizienten gegenüber der Mikrowelle aufweist.

Die dargestellten Ergebnisse wurden weiter dahingehend ausgewertet, daß die Meßunsicherheiten f_i des jeweiligen Verfahrens in Bezug zur Ofentrocknung ermittelt wurden.

$$f = \frac{w - w_{\text{rad}}}{w}$$

mit	f	= Meßunsicherheit	[-]
	w	= Wassergehalt (Ofentrocknung)	[-]
	w_{rad}	= Wassergehalt (radiometrisch)	[-]

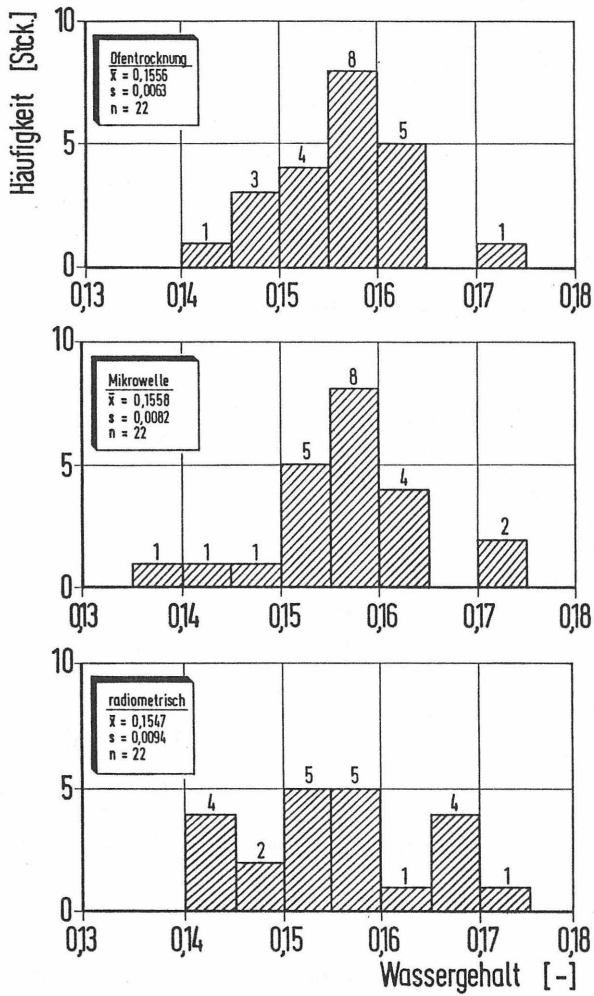


Bild 86: Häufigkeitsverteilungen für die Bestimmung des Wassergehalts nach drei Verfahren auf einem Probefeld

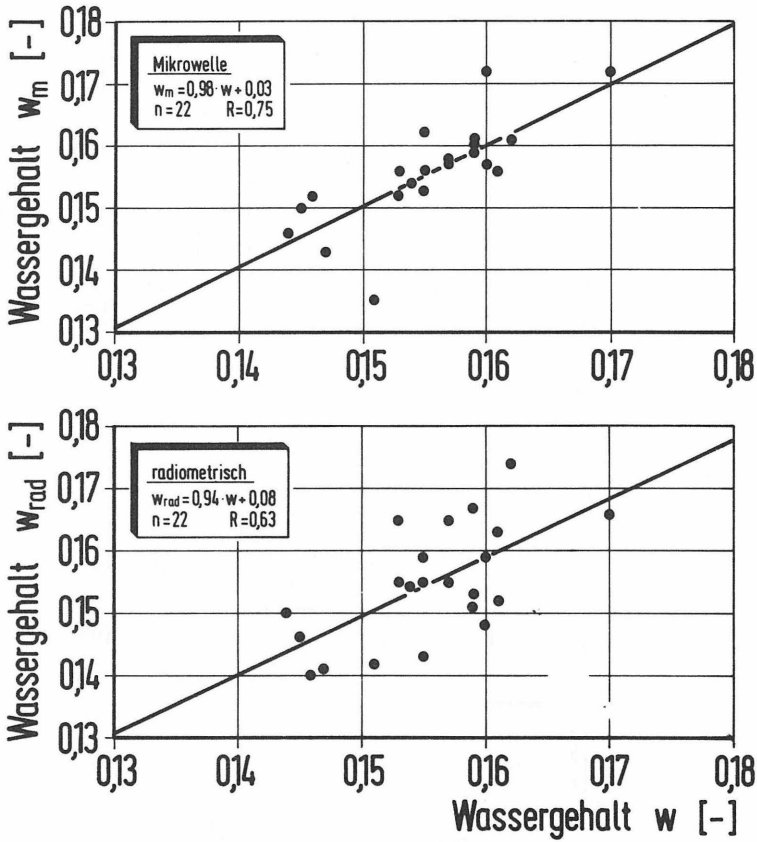


Bild 87: Ergebnisse der Wassergehaltsbestimmung nach verschiedenen Verfahren in Bezug zur Ofentrocknung

Diese Berechnung wurde für alle beide Verfahren, jeweils bezogen auf die Ofentrocknung, durchgeführt. Die sich ergebenden Mittelwerte sowie die Standardabweichungen der Meßunsicherheiten sind in Bild 88 zusammengestellt. Für den untersuchten Boden sind die systematischen Fehler offensichtlich zu vernachlässigen.

Wie bereits bei der Darstellung der Häufigkeitsverteilungen der Einzelwerte der Wassergehaltsbestimmung ist der zufällige Fehler, ausgedrückt durch die einfache Standardabweichung, für das radiometrische Verfahren deutlich geringer als für das Mikrowellenverfahren. Zu beachten ist jedoch die offensichtlich geringe Reproduzierbarkeit bei allen Verfahren. Die Vergleichbarkeit des radiometrischen Verfahrens mit genormten Verfahren ist nur eingeschränkt nachgewiesen.

Verfahren	Meßunsicherheit f	
	Mittelwert	Standardabweichung
	x [-]	s [-]
Mikrowelle	-0,001	0,035
radiometrisch	0,006	0,047

Bild 88: Mittelwerte und Standardabweichungen der auf die Ofentrocknung bezogenen Meßunsicherheiten verschiedener Verfahren der Wassergehaltsbestimmung

6.4.6 Berechnung der Trockendichte

Bei der für die vorliegenden Untersuchung verwendeten radiometrischen Sonde wird die Wassermasse tiefenunabhängig gemessen. Der in die Sonde eingebaute Prozeßrechner berechnet die Trockendichte durch Bezug der gemessenen Wassermasse zur zeitgleich tiefenabhängig gemessenen Feuchtdichte.

Die angezeigte Trockendichte kann deshalb nur verwendet werden, wenn die im folgenden genannten Bedingungen beachtet werden.

- Über die gesamte Meßtiefe muß ein annähernd konstanter Wassergehalt vorhanden sein. Unmittelbar nach Herstellung der Schicht einer Basisabdichtung ist dies in der Regel gewährleistet.
- Nur bei über der Tiefe konstanter Feuchtdichte kann die gemessene Wassermasse zur Berechnung der Trockendichte verwendet werden, da die Wassermasse ein volumenbezogener Wert ist. Wird eine Änderung der Feuchtdichte über die Tiefe beobachtet, sollte besser der Wassergehalt der Messung als Aufsetzsonde verwendet werden.

6.4.7 Beurteilung

Als Meßzeit zur Bestimmung der Feuchtdichte und des Wassergehalts mit dem radiometrischen Verfahren ist eine Minute ausreichend. Allerdings sollte diese Messung dreifach wiederholt werden, um durch Mittelwertbildung die Zufälligkeiten des radioaktiven Zerfalls auszugleichen. Dieser Zeitgewinn ist für die Güteüberwachung mineralischer Basisabdichtungen von großer Bedeutung.

Bei der Bestimmung der Feuchtdichte mit dem radiometrischen Verfahren ist mit einem relativen mittleren Fehler - ausgedrückt durch die einfache Standardabweichung - von

$$\Delta P = 0,015 \cdot P$$

gegenüber dem Ausstechzylinderverfahren zu rechnen. Gleiche Fehlergrenzen wurden beim auch beim Vergleich genormter Ersatzverfahren gegenüber dem Ausstechzylinderverfahren beobachtet.

In Abhängigkeit von der Bodenart ist mit unterschiedlichen systematischen Fehlern zu rechnen. Der größte in den vorgelegten Untersuchungen nachgewiesene systematische Fehler ist jedoch vernachlässigbar. Er muß durch Vergleichsuntersuchungen vor Beginn der Güteüberwachung, zum Beispiel im Rahmen des Probefeldes, bestimmt werden.

Bei der Bestimmung des Wassergehalts mit dem radiometrischen Verfahren ist mit einem relativen mittleren Fehler - ausgedrückt durch die einfache Standardabweichung - von

$$\Delta w = 0,05 \cdot w$$

zu rechnen. Diese Fehlergrenzen sind erheblich gegenüber anderen Verfahren.

In Abhängigkeit von der Bodenart ist mit unterschiedlichen systematischen Fehlern zu rechnen. Der größte in den vorgelegten Untersuchungen nachgewiesene systematische Fehler ist jedoch vernachlässigbar. Er muß durch Vergleichsuntersuchungen vor Beginn der Güteüberwachung, zum Beispiel im Rahmen des Probefeldes, bestimmt werden.

6.5. Bestimmung des Anteils eingemischten Bentonits

6.5.1 Allgemeines

Im Rahmen der Güteüberwachung soll die Menge und die homogene Verteilung des gegebenenfalls eingemischten Bentonits bestimmt werden. Vor allem für die Bestimmung der homogenen Verteilung ist im Rahmen der Güteüberwachung von Basisabdichtungen noch kein Verfahren gebräuchlich. In Abschnitt 5.5 wird dazu das Methylenblau-Verfahren aus der Giessereitechnik vorgeschlagen.

Zur Überprüfung der Eignung dieses Versuchstyps wurden Versuche zur Genauigkeit und Reproduzierbarkeit ausgeführt. Dabei kam es besonders auf den Unterschied im Absorptionsvermögen bindiger Grundmaterialien und zu verwendender Bentonite an. Die Trennschärfe, das heißt die Möglichkeit, geringe Anteile Bentonite im Grundmaterial nachzuweisen, wurde durch Untersuchung kontrolliert hergestellter Mischungen bestimmt.

Für alle Versuche wurde die photometrische Methode entsprechend Merkblatt P35 zur Bestimmung des bindefähigen Anteils (N.N. 1975b) verwendet. Das verwendete Photometer arbeitete mit einer Wellenlänge des Lichts von 390 nm. Für die Versuche wurde Methylenblau

für Absorptionstests (Merck-Nr. 6040) benutzt. Dabei wurden mit aqua dest. Stammlösungen mit einem Anteil von 0,4 % und 0,6 % Methylenblau hergestellt.

Die im folgenden angegebenen Lichtdurchlässigkeiten sind relative Lichtdurchlässigkeiten. Ein Wert von 0 % entspricht dabei der Lichtdurchlässigkeit der jeweiligen reinen Stammlösung. Ein Wert von 100 % entspricht der Lichtdurchlässigkeit von aqua dest.

6.5.2 Genauigkeit und Reproduzierbarkeit

6.5.2.1 Verwendete Materialien

Die Versuche wurden mit einem tonigen, sandigen Schluff als Grundmaterial und dem aktivierten Natrium-Bentonit IKO-Seal der Firma Industriekohle GmbH durchgeführt.

Der Schluff enthielt einen Tonanteil von $T = 18 \%$ und wies eine Fließgrenze von $w_L = 0,227$ sowie ein Wasserbindevermögen von $w_b = 0,412$ auf. Bodenmechanisch handelte es sich um einen leicht plastischen Ton (Bodengruppe TL nach DIN 18.196). Diese Kennwerte zeigen, daß der verwendete Boden über ein eigenes Absorptionsvermögen verfügte. Bild 89 zeigt die Bestimmung der Eichkurven der Lichtdurchlässigkeit des Grundmaterials für beide verwendeten Stammlösungen.

Der verwendete Bentonit ließ sich am besten durch sein Wasserbindevermögen charakterisieren. Das Wasserbindevermögen lag mit $w_b = 5,53$ im für Basisabdichtungen üblichen Bereich. Bild 90 zeigt die Bestimmung der Eichkurven der Lichtdurchlässigkeit für den verwendeten Bentonit.

Bei der Auswertung der Eichkurven fällt auf, daß es im Randbereich der Eichkurven zu Ungenauigkeiten kommt. Beispielsweise ist bei einer Einwaage von 10 g des Grundmaterials in die 0,4 %ige Stammlösung bereits nahezu der gesamte Farbstoff absorbiert. Eine weitere Erhöhung der Einwaage bis auf 12 g kann dann nicht mehr zu exakten Ergebnissen führen. Gleiches gilt für kleine Einwaagemengen bis etwa 3 g in die 0,6 %ige Stammlösung. Hier

reicht die Menge der vorhandenen absorptionsfähigen Bestandteile nicht aus, die Stammlösung nennenswert zu entfärben.

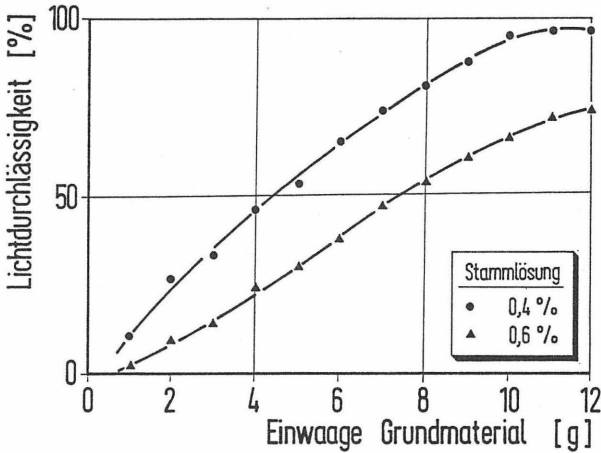


Bild 89: Lichtdurchlässigkeiten des Grundmaterials für zwei Stammlösungen

Diese Problematik ist im Merkblatt P35 (N.N. 1975b) berücksichtigt. Hier wird vorgeschlagen, nur im Bereich von Lichtdurchlässigkeiten von 25 % bis 75 % zu arbeiten. Dies ist nur zu gewährleisten, wenn die Einwaagemengen und die Konzentrationen der Stammlösungen aufeinander abgestimmt werden. Auch dazu dient die Aufnahme von Eichkurven der Lichtdurchlässigkeit.

6.5.2.2 Untersuchung von Mischungen

Bevor die Untersuchung von Mischungen aus Grundmaterial und Bentonit begonnen wurde, sind Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit einer Einzelmessung durchgeführt worden.

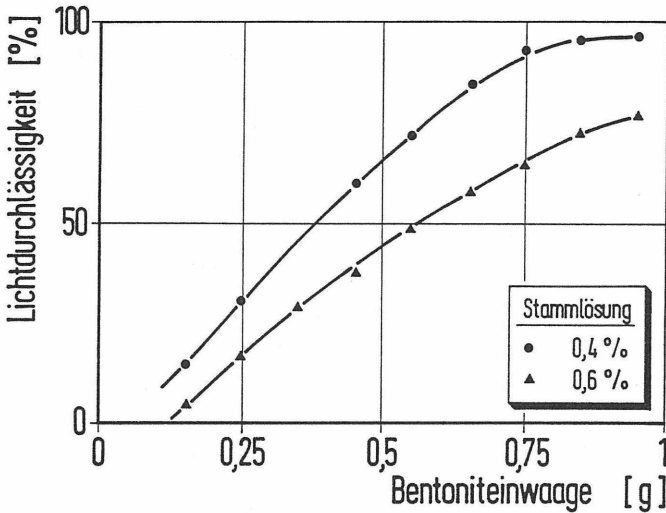


Bild 90: Lichtdurchlässigkeiten des Bentonits für zwei Stammlösungen

Dazu wurde eine größere Menge der Stammlösung 0,6 % hergestellt und eine größere Menge des Grundmaterials durch Mörsern homogenisiert. Mit diesen Materialien konnten 55 Einzelbestimmungen der Lichtdurchlässigkeit unter Verwendung von jeweils 5 g Boden ausgeführt werden. Für die Bestimmung der Lichtdurchlässigkeiten war ein Zeitraum von 5 Tagen erforderlich. Die Versuche wurden in 6 Serien von 2 Laboranten ausgeführt. In diesen Bestimmungen sind alle Wägefehler, alle Fehler der Filtration, der Gerätefehler des Photometers sowie alle zufälligen Einflüsse des Laborbetriebs enthalten. Bild 91 zeigt die Häufigkeitsverteilung der 55 Bestimmungen. Es hat sich ein zu erwartender Fehler - ausgedrückt durch die einfache Standardabweichung - von 1,12 % der relativen Lichtdurchlässigkeiten ergeben.

Berücksichtigt man die Steigung der Eichkurve des Bildes 90 im mittleren Bereich, kann der zu erwartende Gesamtfehler ausschließlich in einen Bestimmungsfehler des eingemischten Bentonits umgerechnet werden. Es ergibt sich daraus eine zu erwartende Ungenauigkeit der

Berechnung von 0,0076 g Bentonit bezogen auf das eingewogene Grundmaterial von 5 g. Dies entspräche einer Bentonitzugabe von 0,15 %.

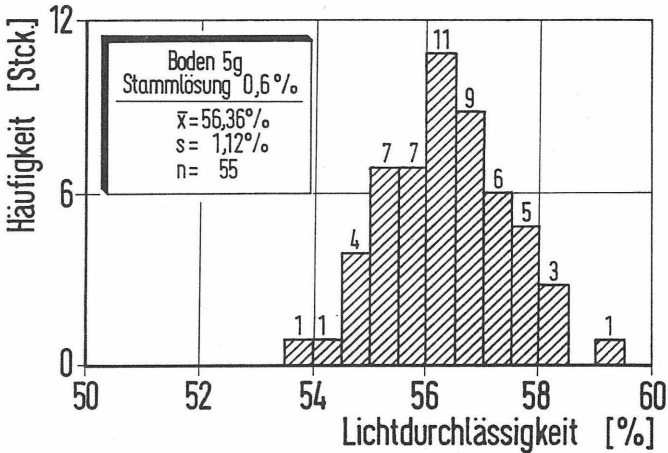


Bild 91: Reproduzierbarkeit der Bestimmung der Lichtdurchlässigkeit

Für einen weiteren Untersuchungsschritt wurden dann jeweils 5 g des Grundmaterials mit unterschiedlichen Bentonitzugaben von 0 % bis 12 % gemischt und mit beiden Stammlösungen untersucht. Die Bilder 92 und 93 zeigen die beiden ermittelten Eichkurven. Bei der Auswertung der sich ergebenden Eichkurven zeigt sich, daß die Stammlösung 0,6 % (Bild 93) im gesamten Bereich bis zu einer Bentonitzugabe von 12 % im zugelassenen Bereich zwischen 25 % und 75 % der Lichtdurchlässigkeit liegt. Der Verlauf der Eichkurve ist auch für den gesamten Bereich nahezu linear. Für die Stammlösung 0,4 % wird der zulässige Bereich bereits bei einer Bentonitzugabe von 4 % verlassen.

Unter Verwendung der Bilder 89 und 90 hätten die sich aus den eingewogenen Boden- und Bentonitmengen ergebenden Lichtdurchlässigkeiten auch durch Addition ermittelt werden

können. Diese Werte sind als "rechnerische" Eichkurve in die Bilder 92 und 93 übertragen worden. Dabei zeigt sich, daß diese rechnerische Ermittlung nicht zulässig ist, vermutlich weil entweder bei den einzelnen Werten oder bei der Addition der zulässige, annähernd lineare Bereich verlassen wird.

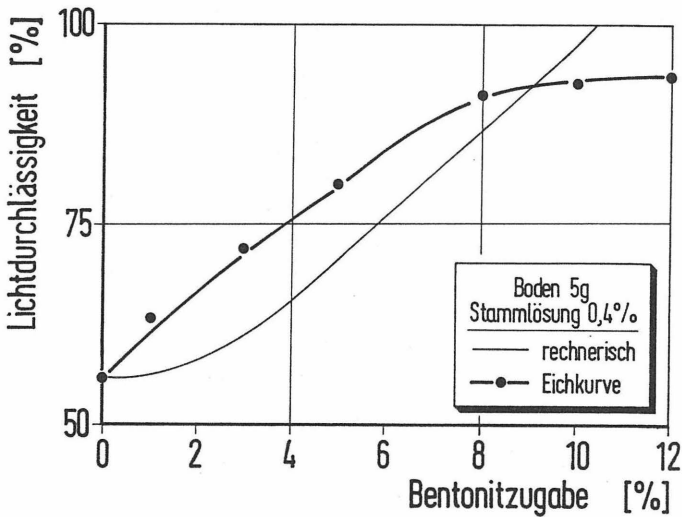


Bild 92: Lichtdurchlässigkeiten des Grundmaterials und unterschiedlicher Bentonitzugaben für die Stammlösung 0,4 %

6.5.3 Beurteilung

Berücksichtigt man besonders die Untersuchungen mit der Stammlösung 0,6 %, so zeigt sich, daß die Zugabe von je 1 % Bentonit zu einem selbst absorbierenden Grundmaterial eine Erhöhung der Lichtdurchlässigkeit von 3,75 % bedeutet. Bei einem zu erwartenden Fehler der

Einzelbestimmung von 1,12 % der Lichtdurchlässigkeit (Bild 91) muß deshalb von einem zu erwartenden Fehler von

$$\pm 0,15 \% \text{ Bentonitzugabe}$$

ausgegangen werden. Dieser Fehler ist zur Bestimmung der Homogenität des eingemischten Bentonits ausreichend klein.

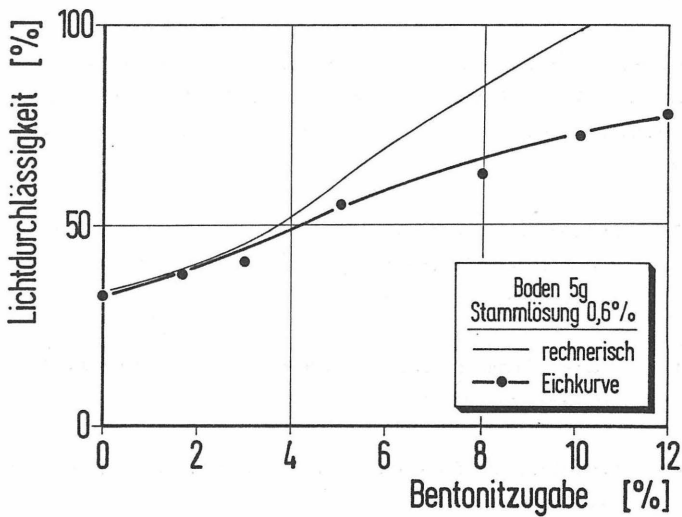


Bild 93: Lichtdurchlässigkeiten des Grundmaterials und unterschiedlicher Bentonitzugaben für die Stammlösung 0,6 %

Voraussetzung für die Genauigkeit ist, daß zunächst Eichkurven des verwendeten Grundmaterials und Bentonits aufgenommen werden. Aus den Ergebnissen wird die erforderliche Einwaagemenge und die Konzentration der Stammlösung ermittelt. Mit diesen Randbedingungen muß dann eine weitere Eichkurve der Mischung mit verschiedenen, im

Untersuchungsbereich liegenden Bentonitzugaben ermittelt werden. Diese Eichkurve ist erneut auf die Einhaltung der Meßgrenzen zwischen 25 % und 75 Lichtdurchlässigkeit zu prüfen. Einwaagemengen oder die Stammlösung sind gegebenenfalls zu anzupassen.

6.6. Baustellenversuche

6.6.1 Überblick

Die im Rahmen von Eignungsprüfungen ermittelten Eigenschaften mineralischer Abdichtungsmaterialien für Basisabdichtungen müssen im Rahmen von Güteüberwachungen auf der Baustelle überprüft werden. Für die Güteüberwachung sind drei Punkte von besonderer Bedeutung:

- Lassen sich die erwarteten Eigenschaften unter den besonderen Randbedingungen der Baustelle, mit den vorgesehenen Maschinen und mit dem vorgesehenen Bauablauf erreichen?
- Deckt die Eignungsprüfung die gesamte Breite der natürlichen Schwankung der Bodenkenwerte ab?
- Gewährleistet die Bauausführung eine durchgehend gleiche Qualität des Abdichtungsystems?

Um diese Fragen beantworten zu können, werden auf der Baustelle umfangreiche Untersuchungen durchgeführt und Proben entnommen. Über das übliche Vorgehen hinaus wurden im Rahmen dieser Arbeit Untersuchungen mit Schnellverfahren durchgeführt, um deren Eignung im Baustelleneinsatz zu erproben. Da es dabei nur um die Verfahren selbst geht, wird bei der Beschreibung der beiden Beispiele nicht nach Probefeld, Eigen- und Fremdüberwachung unterschieden.

Bei den Beispielen handelt es sich um zwei Hausmülldeponien, für die jeweils neue Bauabschnitte herzurichten waren. Im folgenden sind die Ergebnisse der Bestimmung mit Schnellverfahren und deren Bezug zu den Ergebnissen bekannter Verfahren dargestellt. Auf die Beschreibung der vollständigen Überwachungsergebnisse wird verzichtet.

6.6.2 Abdichtung mit ausgeprägt plastischem Ton

Im Jahr 1988 wurde der zweite Bauabschnitt einer Hausmülldeponie im westlichen Niedersachsen hergestellt. Die Abdichtung wurde als Kombinationsabdichtung ausgeführt. Der mineralische Teil wurde aus einem in der Nähe der Deponie anstehenden, ausgeprägt plastischen Ton in zwei Lagen hergestellt. Bild 94 zeigt die Zusammenstellung der in der Eignungsprüfung gefundenen Kennwerte.

Im Rahmen der Güteüberwachung dieser Baustelle konnten vor allem die Beziehungen zwischen den Schnellverfahren der radiometrischen Dichte- und Wassergehaltsbestimmung, der Wassergehaltsbestimmung mit Mikrowellen, der Dichtebestimmung mit dem Ausstechzylinderverfahren sowie der Wassergehaltsbestimmung durch Ofentrocknung untersucht werden. Alle genannten Versuche wurden in einem Feldlabor unmittelbar auf der Baustelle ausgeführt, so daß Fehlereinflüsse durch Proben transport und zeitlicher Verzögerung minimiert werden konnten.

In vergleichende Betrachtungen wurden dabei nur Werte einbezogen, bei denen die jeweils zu vergleichenden Werte an einer Probenahmestelle entnommen wurden. Die Methode der Auswertung wird im folgenden am Beispiel des Vergleichs der Wassergehaltsbestimmung durch Ofentrocknung und mit Mikrowellen vorgestellt.

Im Rahmen der Baustelle konnten an 53 Probenahmestellen gleichzeitig der Wassergehalt im Trockenofen und im Mikrowellenherd bestimmt werden. Bild 95 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der Wassergehalte nach beiden Verfahren. Dabei wird deutlich, daß ein systematischer Fehler zwischen beiden Verfahren von $w = 0,0167$ vorliegt. Dieses Ergebnis war aufgrund

Kennwert	Dim.	Größe
Tongehalt T	%	35,0 - 74,0
Schluffgehalt U	%	22,0 - 47,0
Sandgehalt S	%	1,0 - 29,0
Wassergehalt w_n	-	0,281 - 0,578
Fließgrenze w_L	-	0,725 - 0,760
Ausrollgrenze w_p	-	0,181 - 0,202
Plastizitätszahl I_p	-	0,531 - 0,558
Aktivitätszahl I_A	-	0,72 - 1,16
Wasserbindevermögen w_b	-	0,80 - 0,88
Kalkgehalt v_{ca}	-	0,033 - 0,061
Glühverlust v_{gl}	-	0,034 - 0,067
Proctordichte ρ_{p_r}	t/m^3	1,37
opt. Wassergehalt w_{p_r}	-	0,34
Durchlässigkeit k	m/s	$\leq 1 \cdot 10^{-10}$

Bild 94: Zusammenstellung der Bodenkennwerte aus der Eignungsprüfung für die Abdichtung mit ausgeprägt plastischem Ton

der Untersuchungen in Abschnitt 6.2 für den Ton auch erwartet worden. Die Betrachtung der Standardabweichungen ist beim Vergleich beider Bestimmungsverfahren hier nicht von Bedeutung, da damit im wesentlichen nur die Schwankung des Wassergehalts über die Bauzeit beschrieben wird. Vielmehr ist es hier sinnvoll, die ermittelte Spannweite z der Meßwerte zu betrachten. Beide Verfahren liegen hier mit $z = 0,101$ (Ofentrocknung) und $z = 0,120$ (Mikrowelle) in der gleichen Größenordnung.

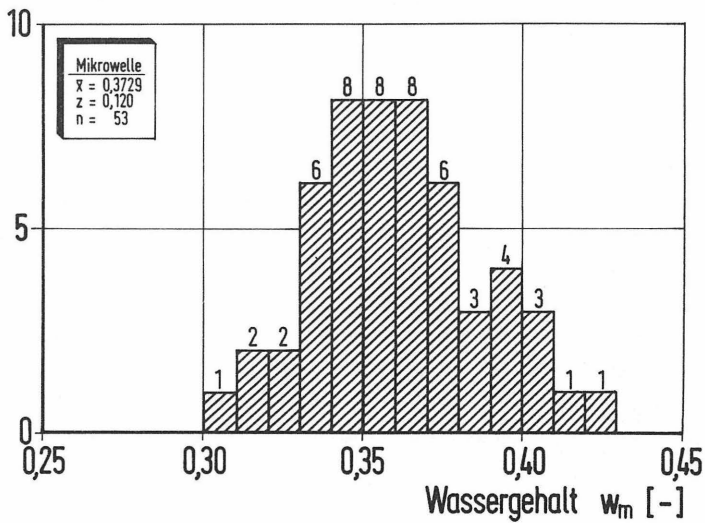
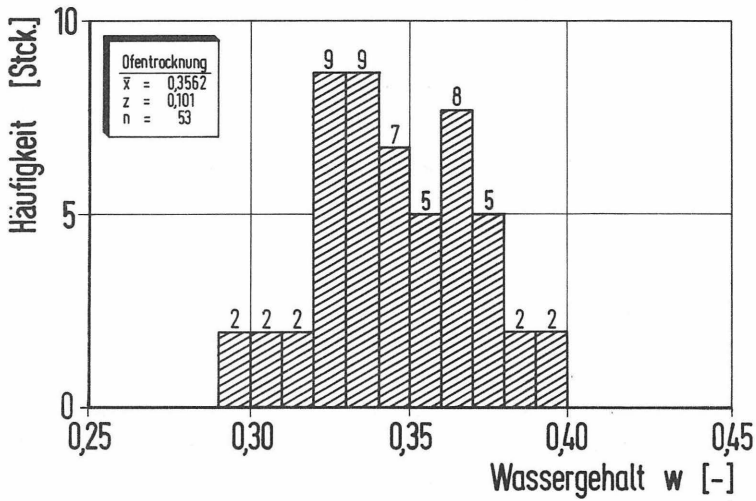


Bild 95: Vergleich der ermittelten Wassergehalte durch Ofentrocknung und mit Mikrowellen für die Abdichtung mit ausgeprägt plastischem Ton

Mit Wertepaaren des Wassergehalts, die nach beiden Verfahren an der gleichen Probenahme-
stelle bestimmt wurden, wird die lineare Regression berechnet. Nach der Gleichung

$$f = \frac{w - w_m}{w}$$

mit	f	= Meßunsicherheit	[-]
	w	= Wassergehalt Ofentrocknung	[-]
	w _m	= Wassergehalt Mikrowelle	[-]

wird die Meßunsicherheit zwischen beiden Verfahren an einer Meßstelle bestimmt. Bild 96 zeigt die Ergebnisse dieser Darstellung. Die Regressionsrechnung hat eine Korrelation mit ausreichender Bestimmtheit ergeben. Bei der Auswertung der Meßunsicherheiten fällt allerdings auf, daß im Extremfall zwischen beiden Verfahren eine Abweichung von über 15 % zu beobachten ist. Selbst wenn diese Abweichung um den systematischen Fehler bereinigt wird, verbleibt eine Abweichung von über 10 %.

Nach dem Normalverteilungsgesetz liegen 95 % aller Werte im Bereich der doppelten Standardabweichung. Unter dieser Voraussetzung liegen im vorgestellten Beispiel 95 % aller Abweichungen in einem Bereich von $\pm 8,4$ % des Meßwertes. Diese Meßunsicherheit erscheint sehr hoch. Hinweise darauf, auf welches der beiden Verfahren dies zurückzuführen ist, liegen nicht vor.

Nach der gleichen Vorgehensweise wurden die Bestimmung des Wassergehalts nach dem radiometrischen Verfahren und der Ofentrocknung sowie die radiometrische Dichtebestimmung und das Ausstechzylinderverfahren miteinander verglichen. Bild 97 zeigt die Zusammenstellung der sich aus den statistischen Auswertungen ergebenden Kennwerte dieser Vergleiche.

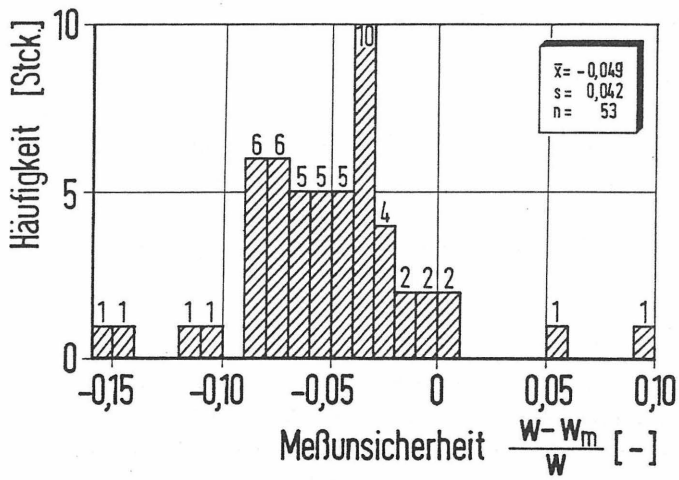
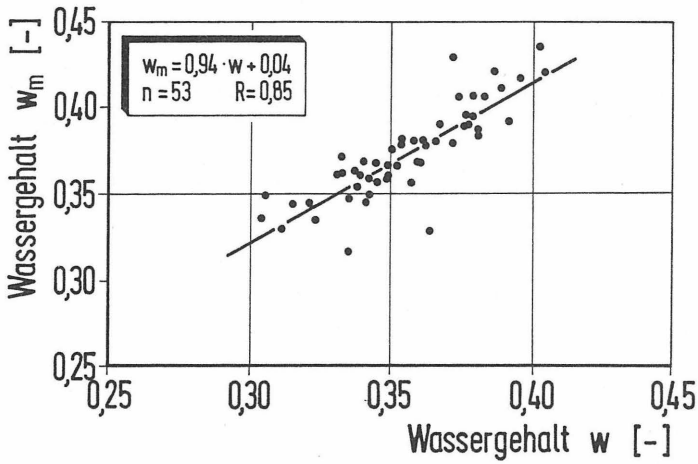


Bild 96: Regressionsrechnung zwischen Ofentrocknung und Mikrowellentrocknung und Häufigkeitsverteilung der Meßunsicherheit

Kennwert	Dim.	Stich- probe n	Mittelwert x	Standard- abweichung s
Wassergehalt				
Ofentrocknung w	-	53	0,356	0,025
Mikrowelle w_m	-	53	0,373	0,027
Meßunsicherheit f	-	53	-0,049	0,042
Wassergehalt				
Ofentrocknung w	-	42	0,353	0,026
radiometrisch w_{rad}	-	42	0,324	0,030
Meßunsicherheit f	-	42	0,079	0,060
Feuchtdichte				
Ausstechzylinder ρ	t/m ³	26	1,845	0,037
radiometrisch ρ_{rad}	t/m ³	26	1,831	0,030
Meßunsicherheit f	-	26	0,007	0,013

Bild 97: Zusammenstellung statistischer Kennwerte aus dem Vergleich der Schnellverfahren mit genormten Verfahren für die Abdichtung aus Ton

Dabei wird deutlich, daß die Wassergehaltsbestimmung nach dem radiometrischen Verfahren mit noch größeren Unsicherheiten behaftet ist. Hier fallen sowohl der große systematische Fehler als der zufällige Fehler auf. Deutlich bessere Ergebnisse sind beim Vergleich der Dichtebestimmung nach dem radiometrischen Verfahren und nach dem Ausstechzylinderverfahren zu beobachten. Der systematische Fehler ist mit $f = 0,007$ vernachlässigbar. Auch der zufällige Fehler ist mit $s = 0,013$ als sehr gut einzuschätzen.

6.6.3 Abdichtung mit bentonitverbessertem Schluff

Im Jahr 1987 wurde ein weiterer Bauabschnitt einer Hausmülldeponie in Rheinland-Pfalz hergestellt. Die Abdichtung wurde als mineralische Abdichtung ausgeführt. Dazu wurde ein in der Nähe der Deponie anstehender Lößlehm mit Bentonit im Einfräsverfahren verbessert und in vier Lagen zu einer Gesamtstärke von 1 m verdichtet. Bild 98 zeigt die Zusammenstellung der in der Eignungsprüfung gefundenen Kennwerte.

Kennwert	Dim.	Größe
Tongehalt T	%	17,0 - 18,0
Schluffgehalt U	%	48,0 - 58,0
Sandgehalt S	%	25,0 - 34,0
Wassergehalt w_n	-	0,095 - 0,130
Fließgrenze w_L	-	0,227 - 0,260
Ausrollgrenze w_p	-	0,110 - 0,121
Plastizitätszahl I_p	-	0,117 - 0,139
Aktivitätszahl I_A	-	0,65 - 0,82
Wasserbindevermögen w_b	-	0,378 - 0,412
Kalkgehalt v_{ca}	-	0,140 - 0,268
Glühverlust v_{gl}	-	0,022 - 0,025
Proctordichte ρ_{p_r}	t/m ³	1,86
opt. Wassergehalt w_{p_r}	-	0,137
Bentonitzugabe	%	3,0
Durchlässigkeit k	m/s	$\leq 1 \cdot 10^{-10}$

Bild 98: Zusammenstellung der Bodenkennwerte aus der Eignungsprüfung für die Abdichtung aus bentonitverbessertem Schluff

Im Rahmen der Güteüberwachung dieser Baustelle konnten neben den Beziehungen zwischen den Schnellverfahren der radiometrischen Dichte- und Wassergehaltsbestimmung, der Wassergehaltsbestimmung mit Mikrowellen, der Dichtebestimmung mit dem Ausstechzylinderverfahren sowie der Wassergehaltsbestimmung durch Ofentrocknung auch die Besonderheiten der Bentoniteinstreuung untersucht werden.

In vergleichende Betrachtungen wurden dabei nur Werte einbezogen, bei denen die jeweils zu vergleichenden Werte an einer Probenahmestelle entnommen wurden. Die Methode der Auswertung wird im folgenden am Beispiel des Vergleichs der Dichtebestimmung durch das Ausstechzylinderverfahren und das radiometrische Verfahren dargestellt.

Im Rahmen der Baustelle konnten an 62 Probenahmestellen gleichzeitig die Dichte mit dem Ausstechzylinderverfahren und mit dem radiometrischen Verfahren bestimmt werden. Mit Wertepaaren der Dichte, die nach beiden Verfahren an der gleichen Probenahmestelle bestimmt wurden, wird die lineare Regression berechnet. Nach der in Abschnitt 6.6.2.1 vorgestellten Methode wird die Meßunsicherheit zwischen beiden Verfahren an einer Meßstelle bestimmt. Bild 99 zeigt die Ergebnisse dieser Darstellung.

Die Regressionsrechnung hat mit $R = 0,51$ eine Korrelation mit ausreichender Bestimmtheit ergeben. Trotzdem wird bei der grafischen Darstellung der Wertepaare eine große Streuung um die Regressionsgerade deutlich. Bei der Auswertung der Meßunsicherheiten ergibt, daß nur bei zwei Ausreißern eine Abweichung von über 5 % zwischen beiden Verfahren zu beobachten ist.

Nach dem Normalverteilungsgesetz liegen 95 % aller Werte im Bereich der doppelten Standardabweichung. Unter dieser Voraussetzung liegen im vorgestellten Beispiel 95 % aller Abweichungen in einem Bereich von $\pm 2,2$ % des Meßwertes. Diese Meßunsicherheit erscheint vertretbar. Hinweise darauf, auf welches der beiden Verfahren dies zurückzuführen ist, liegen nicht vor.

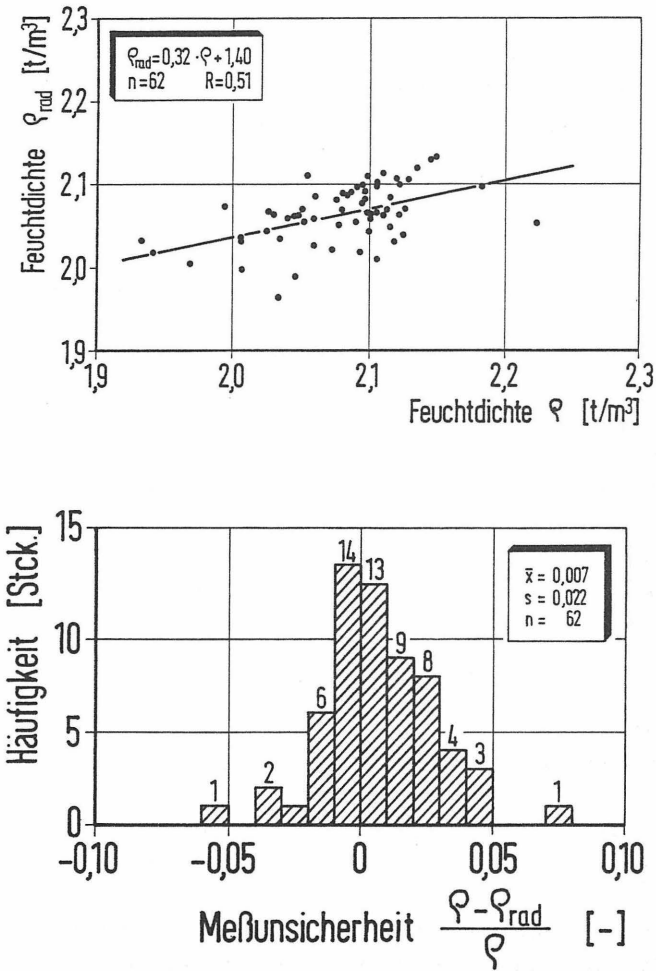


Bild 99: Regressionsrechnung zwischen Ausstechzylinderverfahren und radiometrischem Verfahren und Häufigkeitsverteilung der Meßunsicherheit

Nach der gleichen Vorgehensweise wurden die Bestimmung des Wassergehalts nach dem radiometrischen Verfahren und der Ofentrocknung sowie mit der Mikrowelle und der Ofentrocknung miteinander verglichen. Bild 100 zeigt die Zusammenstellung der sich aus den statistischen Auswertungen ergebenden Kennwerte dieser Vergleiche.

Kennwert	Dim.	Stich- probe n	Mittelwert x	Standard- abweichung s
Wassergehalt				
Ofentrocknung w	-	49	0,147	0,010
Mikrowelle w_m	-	49	0,151	0,010
Meßunsicherheit f	-	49	-0,029	0,057
Wassergehalt				
Ofentrocknung w	-	63	0,144	0,012
radiometrisch w_{rad}	-	63	0,154	0,011
Meßunsicherheit f	-	63	-0,072	0,067
Feuchtdichte				
Ausstechzylinder ρ	t/m ³	62	2,079	0,052
radiometrisch ρ_{rad}	t/m ³	62	2,064	0,035
Meßunsicherheit f	-	62	0,007	0,022

Bild 100: Zusammenstellung statistischer Kennwerte aus dem Vergleich der Schnellverfahren mit genormten Verfahren für die Abdichtung aus bentonitverbessertem Schluff

Dabei wird deutlich, daß die Wassergehaltsbestimmung nach dem radiometrischen Verfahren auch in diesem Beispiel mit den größten Unsicherheiten behaftet ist. Hier fallen sowohl der

große systematische Fehler als der zufällige Fehler auf. Deutlich bessere Ergebnisse sind beim Vergleich der Dichtebestimmung nach dem radiometrischen Verfahren und nach dem Ausstechzylinderverfahren zu beobachten. Der systematische Fehler ist mit $f = 0,007$ genauso groß wie bei der Abdichtung aus Ton. Auch der zufällige Fehler ist mit $s = 0,022$ als ausreichend einzuschätzen. Der Vergleich der Wassergehaltsbestimmung mit dem Trockenofen und dem Mikrowellenherd weist mit einem zu erwartenden Fehler von $f = 0,057$ einen Wert auf, der etwas höher als die zulässige Meßunsicherheit nach DIN 18.121 nur des Ofentrocknungsverfahrens bei Verdichtungsprüfungen ist.

Weitere Untersuchungen auf dieser Baustelle wurden genutzt, um die Schnellverfahren zur Schwankung der bodenmechanischen Eigenschaften des Grundmaterials und der Einmischung des Bentonits zu erproben.

Zunächst wurde die Schwankung der plastischen Eigenschaften des angelieferten Lößlehms durch Bestimmung des Wasserbindevermögens w_b auf der Baustelle bestimmt. Ergänzend wurde nachträglich im Labor die Fließgrenze w_L bestimmt und deren Schwankung mit der des Wasserbindevermögens verglichen. Bei der Auswertung der 67 Versuche zeigt sich, daß der in der Eignungsprüfung festgestellte Schwankungsbereich von $w_b = 0,378 - 0,412$ erheblich größer ist. Vor allem wurden aber Abweichungen zur plastischen Seite festgestellt. Bild 101 zeigt die Häufigkeitsverteilung des ermittelten Wasserbindevermögens, Bild 102 die sich ergebende Beziehung zur Fließgrenze.

Die Qualität des angelieferten Bentonits wurde ebenfalls durch Bestimmung des Wasserbindevermögens w_b bestimmt. Es konnte nachgewiesen werden, daß alle 23 gelieferten Chargen die Anforderungen der Ausschreibung erfüllten. Der für die jeweilige Prüfung erforderliche Zeitraum von 24 Stunden reichte allerdings nicht aus, die Prüfung jeweils bis zur Verwendung des Bentonits abzuschließen.

Besonderes Augenmerk auf dieser Baustelle galt der homogenen Verteilung und Einmischung des Bentonits. Die im Rahmen der Eigenüberwachung von der Baufirma durchgeführten Wägungen der auf ein Blech von $0,25 \text{ m}^2$ ausgestreuten Bentonitmenge wurden aufgezeichnet. Das Ergebnis ist in Bild 103 dargestellt. Bei 101 Messungen ergab sich ein Mittelwert von

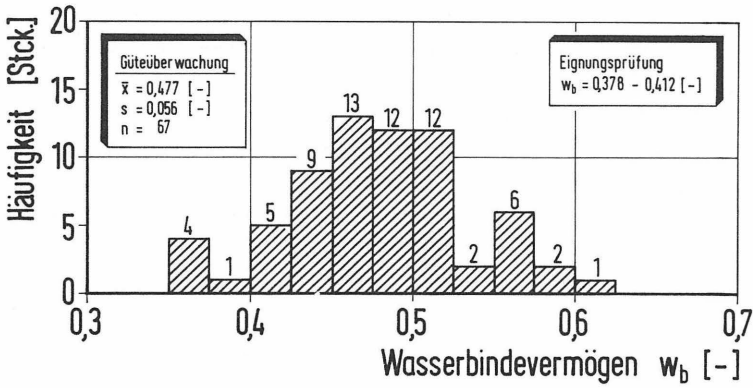


Bild 101: Häufigkeitsverteilung der ermittelten Schwankung des Grundmaterials, ausgedrückt durch das Wasserbindevermögen w_b

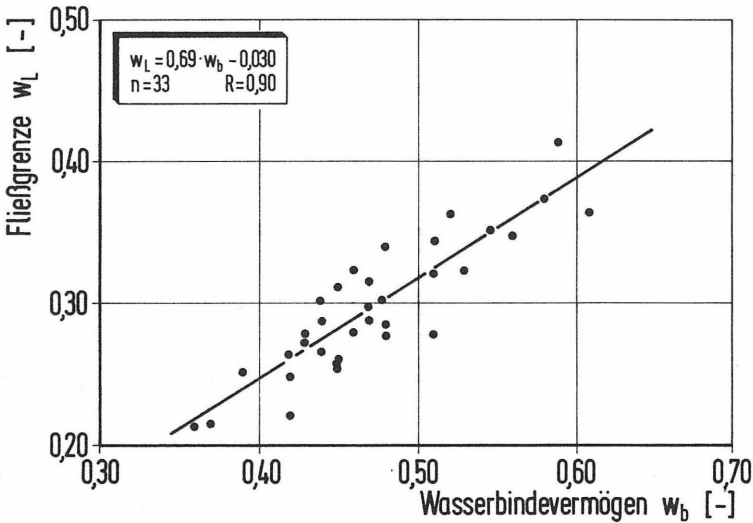


Bild 102: Korrelation zwischen der Fließgrenze w_L und dem Wasserbindevermögen w_b des angelieferten Schluffs

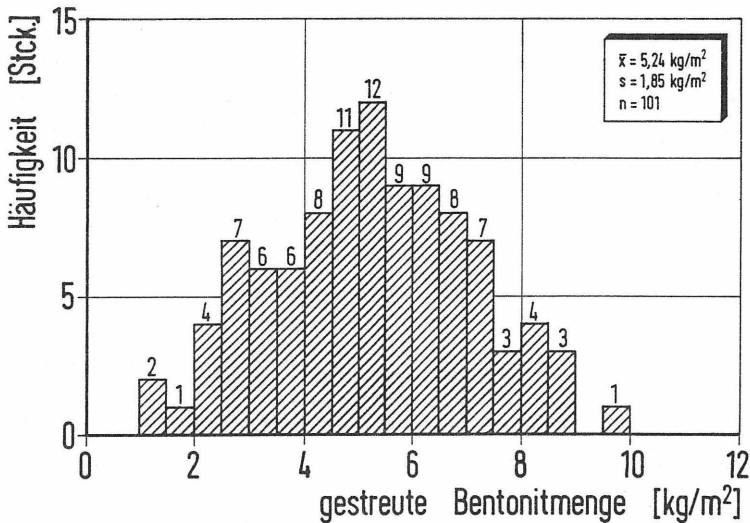


Bild 103: Schwankungsbreite des Ausstreuens von Bentonit

5,24 kg/m² gegenüber einem Sollwert von 5,5 kg/m². Diese relativ gute Übereinstimmung zwischen Mittelwert und Sollwert deckt sich auch mit der tatsächlich verbrauchten Gesamtmenge, die über die Wägezettel der Lieferscheine kontrolliert wurde. Bedenklich ist jedoch die große Streubreite der gewogenen Mengen, ausgedrückt durch eine Standardabweichung von 1,85 kg/m². Ein Ausgleich für diese großen Schwankungen wird dadurch erreicht, daß die geforderte Sollwert von insgesamt 11 kg/m² durch zwei Übergänge mit dem Streufahrzeug erreicht wird.

Die homogene Verteilung des eingemischten Bentonits durch den Fräsvorgang wurde mit der Methylenblau-Methode bestimmt. Dazu wurde mit einem Grundmaterial mittlerer Qualität ($w_b = 0,45$) eine Eichkurve der Lichtdurchlässigkeit für Bentonitzugaben von 0 bis 8 % aufgenommen. An jeder Stelle, an der eine Probe zur Untersuchung entnommen werden sollte, wurde unmittelbar vor dem Bentonitstreuen eine Probe des Grundmaterials entnommen. Die

Differenz der an dieser Probe bestimmten Lichtdurchlässigkeit und der Lichtdurchlässigkeit der Eichprobe ohne Bentonitzugabe wurde als Korrekturwert berücksichtigt. Diese Untersuchungen wurden an 20 Proben durchgeführt. Bild 104 zeigt die Verteilung der ermittelten Bentonitzugaben. Es zeigt sich eine große Schwankung von 0 % bis zu einem Größtwert von 5,9 %. Die Methode hat eine mittlere Bentonitzugabe von 3,1 % ergeben, was sowohl mit der verbrauchten Gesamtmenge als auch mit den aufgestreuten Mengen im Mittel übereinstimmt. Es muß davon ausgegangen werden, daß die ermittelten Werte zuverlässig sind.

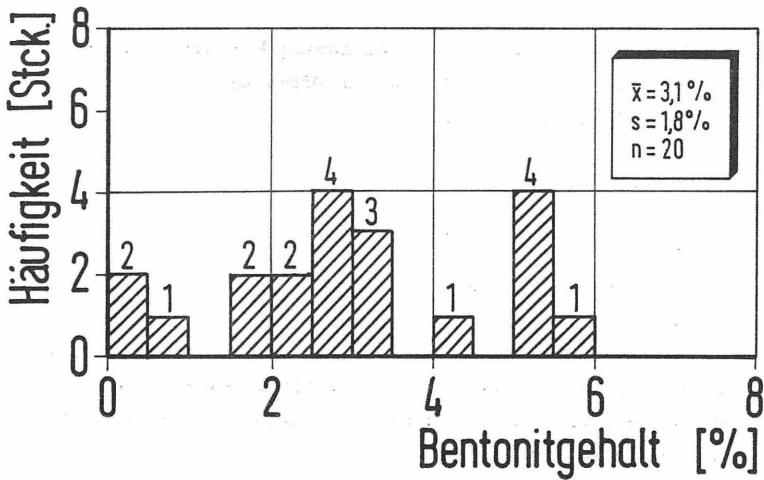


Bild 104: Häufigkeitsverteilung der nach dem Fräsvorgang gefundenen Bentonitzugaben

7. EMPFEHLUNGEN FÜR DIE GÜTEÜBERWACHUNG MINERALISCHER DEPONIEBASISABDICHTUNGEN

7.1 Grundlagen

Diese Empfehlungen regeln die Güteüberwachung mineralischer Deponiebasisabdichtungen und des mineralischen Teils kombinierter Abdichtungen. Vorausgesetzt wird die Eignungsprüfung des Abdichtungsmaterials. Die Eignungsprüfung muß mindestens umfassen:

- Bestimmung der Art und Zusammensetzung des Abdichtungsmaterials
- Festlegung der Anforderungen an die Abdichtung
- Festlegung der Einbaukriterien

Die Güteüberwachung ist in die Elemente

- Eigenüberwachung
- Fremdüberwachung
- Kontrollüberwachung

zu gliedern. Im Rahmen der Eigenüberwachung sind Schnellversuche auszuführen, deren Ergebnisse der Bauleitung und dem die Fremdüberwachung durchführenden Fachmann sofort zur Verfügung zu stellen sind.

Probeverdichtung

Mit der Probeverdichtung soll der ausführende Unternehmer die Eignung der von ihm eingesetzten Geräte und des vorgesehenen Bauablaufs nachweisen. Die Anlage des Probefeldes ist nach den Bedingungen der Baustelle auszurichten.

Der mit der Eigenüberwachung beauftragte geotechnische Fachmann kalibriert im Rahmen der Probeverdichtung die von ihm eingesetzten Schnellverfahren in Bezug auf genormte Ver-

fahren. Für die Bestimmung systematischer Fehler ist das Mittel aus mindestens 10 voneinander unabhängigen Einzelbestimmungen mit dem gleichen Material zu bilden. Über die Untersuchungen ist ein Bericht anzufertigen und dem mit der Fremdüberwachung beauftragten geotechnischen Fachmann vorzulegen.

Die Durchführung von Probeverdrichtungen ist im Einzelfall vom mit der Fremdüberwachung beauftragten geotechnischen Fachmann in Anlehnung an das Vorläufige Merkblatt über Probeverdrichtungen im Straßenbau (N.N. 1968) zu planen, zu beaufsichtigen und auszuwerten.

Eigenüberwachung

Die Eigenüberwachung obliegt dem ausführenden Unternehmer. Der Unternehmer beauftragt einen geotechnischen Fachmann mit der Überwachung. Eigenüberwachung und Fremdüberwachung dürfen nicht in einer Hand liegen.

Aufgrund eigener Erfahrungen auf großen Baustellen, der durchschnittlichen Tagesleistungen sowie einer angemessenen Überwachungsintensität sollten folgende Versuchshäufigkeiten nicht unterschritten werden:

Abdichtungsmaterial

Wasserbindevermögen w_b	1 x je 100 m ³
Wassergehalt Mikrowelle w_m	1 x je 100 m ³

angelieferter Bentonit

Wasserbindevermögen w_b	1 x je Charge
---------------------------	---------------

Abdichtung

Dichte radiometrisch ρ_{rad}	1 x je 500 m ²
Wassergehalt Mikrowelle w_m	1 x je 500 m ²
Bentonitgehalt Streublech	1 x je 500 m ²

Die Ergebnisse der Prüfung des Abdichtungsmaterials und des angelieferten Bentonits sind ständig mit den Anforderungen der Eignungsprüfung zu vergleichen. Die Ergebnisse der Prüfung der Abdichtung sind ständig mit der Festlegung der Einbaukriterien zu vergleichen. Bei Abweichungen ist die Bauleitung und der die Fremdüberwachung durchführende Fachmann unverzüglich zu unterrichten.

Fremdüberwachung

Die Fremdüberwachung obliegt dem Bauherrn. Der Bauherr beauftragt einen geotechnischen Fachmann mit der Überwachung. Mit der Fremdüberwachung darf nicht der gleiche Fachmann beauftragt werden, der die Abfallbeseitigungsanlage geplant oder die Eignungsprüfung durchgeführt hat.

Abdichtungsmaterial

Kornverteilung	1 x je 500 m ³
Zustandsgrenzen w_L/w_p	1 x je 500 m ³
Kalkgehalt v_{ca}	1 x je 1 000 m ³
Glühverlust v_{gl}	1 x je 1 000 m ³
Proctorversuch	1 x je 1 000 m ³
Wasserbindevermögen w_b	1 x je 100 m ³

angelieferter Bentonit

nur Entnahme von Rückstellproben

Abdichtung

Dichte	1 x je 1 000 m ²
Wassergehalt w	1 x je 500 m ²
Wasserdurchlässigkeit k	1 x je 2 500 m ²
Bentonitgehalt	1 x je 1 000 m ²

Kontrollüberwachung

Art und Umfang der im Rahmen der Kontrollüberwachungen auszuführenden Überprüfung liegen im Ermessen der zuständigen Behörde.

7.2 Versuchsdurchführung

Die nicht genormten Versuche sind nach den folgenden Beschreibungen durchzuführen.

Wasserbindevermögen

Das Versuchsgerät und die Arbeitsweise sind bei Neff (1988) beschrieben.

Ergänzend dazu ist zwischen Versuchen mit bindigen Böden einerseits und mit Bentoniten andererseits zu unterscheiden.

Die Proben sind bis zur Gewichtskonstanz bei einer Temperatur von 105° C zu trocknen und zu mörsern. Die Probemenge ist mit 1 g bis zu einem Wasserbindevermögen von $w_b = 2,5$ und darüber mit 0,3 g zu wählen.

Die Versuche sind solange fortzusetzen, bis der Endwert der Wasseraufnahme erreicht ist, längstens jedoch bis 24 Stunden. Bei einer Versuchsdauer von über einer Stunde ist das Probengefäß mit einem Verdunstungsschutz zu versehen.

Dichte nach dem radiometrischen Verfahren

Mit dem radiometrischen Verfahren kann die Feuchtdichte der mineralischen Abdichtung bestimmt werden. Hierzu ist die radiometrische Sonde als Einstichsonde zu verwenden. Die Arbeitsanweisungen des Herstellers sind genau zu beachten.

Radiometrische Sonden sind werksseitig kalibriert. Die Sonden sind jährlich zu rekaliбrieren.

Seitens der Hersteller sind detaillierte Stabilitäts- und Drifftests vorgeschrieben, die versuchsbegleitend ständig auszuführen und zu dokumentieren sind.

Die Einstichtiefe richtet sich nach der zu untersuchenden Schichtstärke der Abdichtung. Für jede Einstichtiefe ist im Rahmen der Probeverdichtung eine Kalibrierung gegenüber genormten Verfahren durchzuführen. Die erforderliche Meßzeit beträgt mindestens 1 Minute. Jede Messung besteht aus drei Einzelablesungen ohne Veränderung der Position der Sonde.

Vor Beginn der Messung ist die Oberfläche im Bereich des Standorts der Sonde sorgfältig zu glätten. Unvermeidliche Fehlstellen sind mit Quarzmehl oder feinstem Quarzsand abzustreuen. Anschließend wird das Einstichloch durch Einschlagen eines Erdnagels hergestellt. Beim Einsetzen der Sonde ist darauf zu achten, daß zwischen dem Strahler und dem Boden kein Luftspalt verbleibt.

Bestimmung des Wassergehalts mit Mikrowellen

Soweit keine abweichenden Regelungen angegeben sind, wird die Bestimmung des Wassergehaltes mit dem Mikrowellenherd analog zur Bestimmung des Wassergehalts durch Ofentrocknung nach DIN 18121 durchgeführt.

Als Versuchsgerät kann ein handelsüblicher Mikrowellenherd mit Drehteller, regelbarer Leistung und programmierbarer Zeitschaltuhr verwendet werden. Für die Probengefäße ist ausschließlich Porzellan oder spezielles Mikrowellengeschirr aus Polypropylen zu verwenden. Bei der Untersuchung bindiger Böden kann sich die Probe so schnell aufheizen, daß sie während der Versuchszeit zerspringt. Deshalb sind die Probengefäße während des Versuchs luftdurchlässig abzudecken, z. B. mit einem lose aufliegenden Deckel gleichen Materials.

Die Erhitzung der Probe richtet sich nach der zu verdampfenden Wassermasse und der gewählten Leistung. Um die Probe nicht extrem aufzuheizen, sollte die Leistung von 400 W nicht überschritten werden. In Vorversuchen ermittelte Trocknungszeiten müssen um einen Sicherheitszuschlag von 50 % erhöht werden.

Bestimmung des Bentonitgehalts

Aufgabe der Güteüberwachung ist:

- Kontrolle der Bentonitmenge
- Kontrolle der homogenen Verteilung.

Die ausgestreute Bentonitmenge wird durch das Auswiegen des auf ein unter das Streufahrzeug gelegten Bleches (etwa $0,25 \text{ m}^2$) gefallenem Bentonits bestimmt. Zusätzlich ist eine Kontrolle der Gesamtmenge des für einen definierten Bauabschnitt gelieferten Bentonits durchzuführen.

Für die Kontrolle der homogenen Verteilung wird das Methylenblau-Verfahren (N.N. 1975b) angewendet. Dabei wird die Eigenschaft des Bentonits, den Farbstoff Methylenblau zu adsorbieren, genutzt. Von einer Referenzprobe des bei 105° C bis zur Gewichtskonstanz getrockneten Bentonits werden 5 abgestufte Mengen zwischen 0,2 g und 0,7 g auf 0,001 g genau gewogen. Mit jeweils 25 ml destillierten Wassers und 5 ml gesättigter Tetranatrium-Diphosphat-Lösung wird je eine Bentonitsuspension hergestellt. Die Suspension wird eingedampft. Nach dem Abkühlen wird der Rückstand mit einigen Glaskugeln und 100 ml Methylenblau-Stammlösung geschüttelt. Anschließend wird über einen Membranfilter filtriert und das Filtrat mit destilliertem Wasser verdünnt. Von dieser Lösung wird die Lichtdurchlässigkeit im Photometer bei einer Wellenlänge im Bereich von 370 bis 470 nm gegen destilliertes Wasser gemessen. Mit den gemessenen Lichtdurchlässigkeiten der 5 abgestuften Mengen wird eine Eichkurve aufgestellt.

Abgestufte Mengen von etwa bis zu 5 g des Abdichtungsmaterials (Grundmaterial) je nach erwartetem Bentonitgehalt werden dem gleichen Verfahren unterzogen. Dabei ist darauf zu achten, daß nur im Bereich von Lichtdurchlässigkeiten von 25 % bis 75 % gearbeitet wird. Um dies zu gewährleisten, sind die Einwaagemengen und die Konzentrationen der Stammlösungen aufeinander abzustimmen.

Proben des auf der Baustelle entnommenen Abdichtungsmaterials werden nach Einwaagemenge und Stammlösung wie Proben des Grundmaterials behandelt. Aus dem Vergleich der ermittelten Lichtdurchlässigkeit mit den Eichkurven des Grundmaterials und des Bentonits wird rechnerisch der Bentonitgehalt ermittelt.

8. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Deponiebasisabdichtungen sind ein zunehmend wichtigeres Element der heutigen Abfallbeseitigung. Der mineralischen Abdichtung kommt dabei vor allem die Aufgabe des langfristigen Gewässerschutzes zu. Die Güteüberwachung mineralischer Basisabdichtungen ist ein unverzichtbarer Bestandteil des Qualitätssicherungssystems geworden. Besonders effektiv ist die Güteüberwachung dann, wenn ihre Ergebnisse unmittelbar zur Verfügung stehen, so daß sie zur Bauüberwachung und Baulenkung eingesetzt werden können.

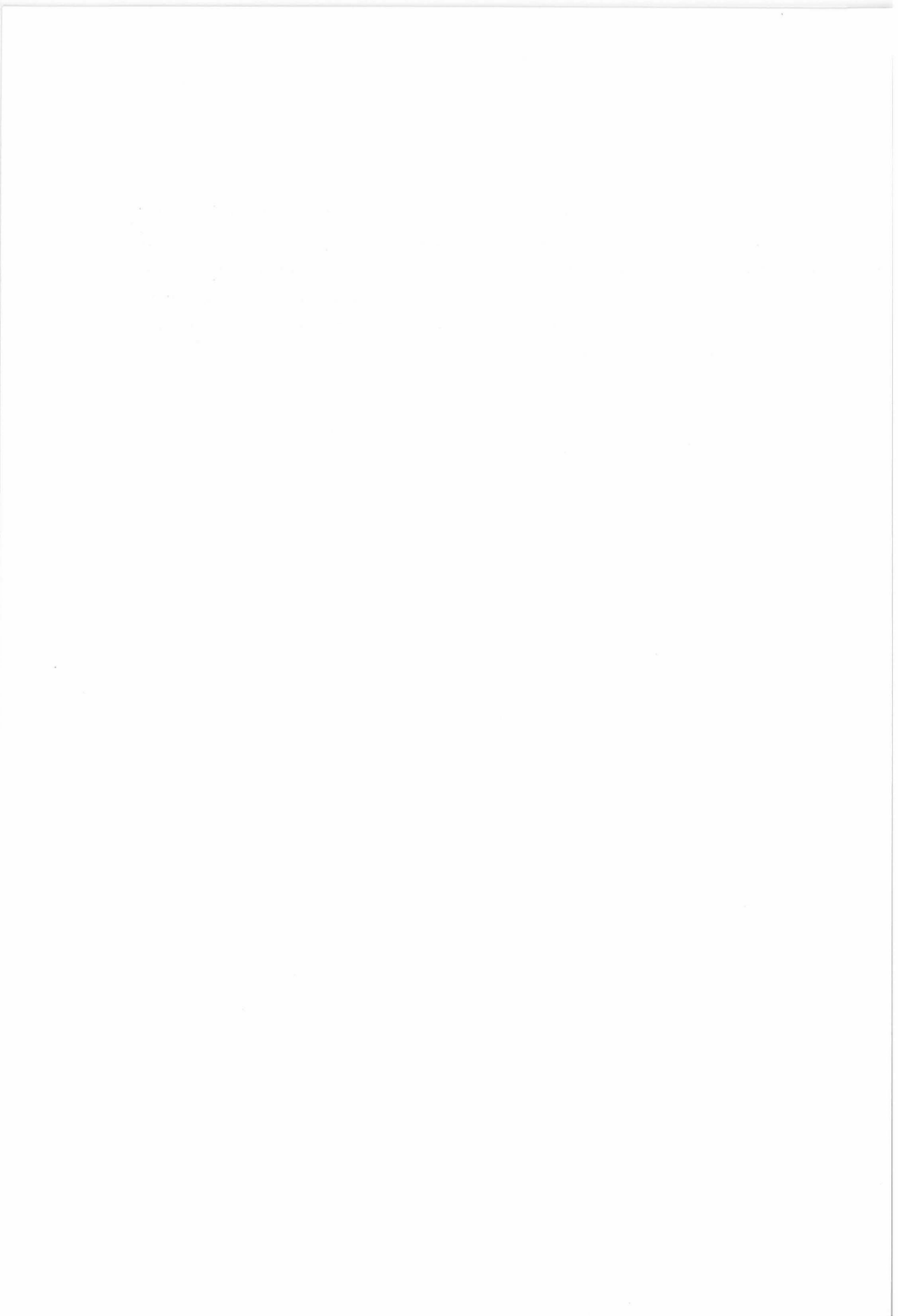
Im Rahmen dieser Arbeit wurden Schnellverfahren für die Güteüberwachung mineralischer Deponiebasisabdichtungen auf ihre Genauigkeit und Reproduzierbarkeit untersucht. Dabei wurden genormte, aber zeitaufwendige Versuche so weit als möglich zum Vergleich herangezogen. Generell hat sich die Reproduzierbarkeit der Schnellverfahren als gut erwiesen. Wegen der unterschiedlichen physikalischen Grundlagen gegenüber genormten Verfahren ist jedoch immer mit systematischen Fehlern zu rechnen. Diese systematischen Fehler müssen im Vorfeld einer Güteüberwachung ermittelt oder ausgeschlossen werden. Die Untersuchungen im Rahmen eines auszuführenden Probefeldes eignen sich zur Kalibrierung der Verfahren.

Versuche auf Baustellen haben ergeben, daß unter Baustellenbedingungen mit zum Teil erheblichen Schwankungen der Meßergebnisse zu rechnen ist. Dabei sind die Schnellverfahren jedoch nicht als generell schlechter einzustufen. Vielmehr scheint es so zu sein, daß auch die Reproduzierbarkeit der genormten Verfahren unter Baustellenbedingungen häufig überschätzt wird.

Insbesondere das Verfahren des Einmischens von Bentonit zur Verbesserung der Durchlässigkeitseigenschaften ist mit großen Inhomogenitäten behaftet. Dieses Verfahren muß zur Verbesserung der Qualität mineralischer Abdichtungssysteme verbessert werden. Moderne Mischanlagen können hierzu einen Beitrag leisten.

Im Zusammenhang mit der Qualitätssicherung mineralischer Deponiebasisabdichtungen erscheinen auch die bisherigen bauvertraglichen Regelungen überarbeitungsbedürftig. Je nach Umfang der auszuführenden Leistungen - zum Beispiel bei vor Ort anstehendem Abdich-

tungsmaterial aus dem Besitz des Auftraggebers - sind die Risikobereiche von Auftraggeber und Auftragnehmer deutlicher abzugrenzen. Die immer wieder geforderte Fertigstellung kleiner Teilbereiche eines Abdichtungsabschnitts ist zur Verbesserung und Erhaltung der Qualität einer Abdichtung erforderlich. Um dies zu ermöglichen, ist die bauvertragliche Abnahme einer Leistung von der abfallrechtlichen Abnahme der Genehmigungsbehörde zu trennen. Schnellverfahren können hierzu einen Beitrag leisten.



- Brandl, H.
1971
Zusammenhänge zwischen den chemisch-physikalischen Eigenschaften stabilisierter Böden, Straßen- und Tiefbau 1971, H. 4, S. 287 - 300, 1971
- Bronstein, I.N.
Semendjajew, K.A.
1974
Taschenbuch der Mathematik, 14. Auflage, Verlag Harri Deutsch, Zürich und Frankfurt/Main, 1974
- Czurda, K.
1987
Ton als geologische Barriere, Symposium Deponiebauwerke, S. 137, Frankfurt 1987
- DIN 18.121
1976
Wassergehalt, Teil 1 und 2, April 1976
- DIN 18.122
1976
Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen), Teil 1 und 2, April 1976
- DIN 18.123
1971
Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Korngrößenverteilung, Vornorm Juni 1971
- DIN 18.124
1973
Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Korndichte mit dem Kapillarpiknometer, Blatt 1, Vornorm März 1973
- DIN 18.125
1972
1975
Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Dichte des Bodens, Blatt 1 und 2, Vornorm, April 1972 und Februar 1975
- DIN 18.127
1976
Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Proctorversuch, Vornorm April 1976

- | | |
|----------------------|---|
| DIN 18.128 | Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung des organischen Anteils, Norm in Vorbereitung |
| DIN 18.129 | Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung des Kalkgehalts, Norm in Vorbereitung |
| DIN 18.130
1986 | Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit, Teil 1, 1986 |
| DIN 18.196
1970 | Erdbau, Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke und Methoden zum Erkennen von Bodengruppen, Juni 1970 |
| DIN 18.200
1986 | Überwachung (Güteüberwachung) von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten, Allgemeine Grundsätze, Dezember 1986 |
| Drescher, J.
1988 | Deponiedichtungen für Sonderabfalldeponien - Arbeitspapier -, Müll und Abfall 1988, Teil 1: H. 7, S. 281, Teil 2: H. 8, S. 338, 1988 |
| Düllmann, H.
1987 | Geotechnische und baubetriebliche Einflüsse auf die Dichtigkeit von Deponieabdichtungen aus Ton, Fortschritte der Deponietechnik 1986, E. Schmidt Verlag, 1987 |
| Dürr, F.
1987 | Qualitätssicherung im Bauwesen - Stiefkind einer Branche, QZ 32, H. 11, S. 549, 1987 |
| Enslin, O.
1933 | Über einen Apparat zur Messung der Flüssigkeitsaufnahme an quellbaren und porösen Stoffen und zur Charakterisierung der Benetzbarkeit, Chemische Fabrik, H. 6, S. 147, 1933 |

- | | |
|--|--|
| Eustacchio, E.
1987 | Überlegungen zur Qualitätssicherung, Bitumen 4, S. 146,
1987 |
| Floss, R.
1984 | Qualitätssicherung der Baustoffe und der Bauausführungen
im Erdbau, Strasse und Autobahn, H. 7, S. 269, 1984 |
| Großmann, W.
1974 | Vermessungskunde I, 12. erw. Auflage, Sammlung Götschen,
Verlag Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1974 |
| Hänsel, W.
1981 | Prüfung der Dichtungswirkung und Beständigkeit von
Deponieabdichtungen mit Bentonit und natürlichen Tonen,
1981 |
| Hasenpatt, R.
Degen, W.
Kahr, G.
1988 | Durchlässigkeit und Diffusion in Tonen, Mitt. d. Instituts für
Grundbau u. Bodenmechanik der ETH Zürich Nr. 133, S.
65, Zürich, 1988 |
| Hoffmann, U.
1942 | Neues aus der Chemie des Tons, Die Chemie, 55. Jahrg., Nr.
37/38, S. 283, 1942 |
| Hoffmann, U.
1956 | Aus der Chemie der hochquellfähigen Tone (Bentonite),
Angewandte Chemie, 68. Jahrg., Nr.2, S. 53, 1956 |
| Horn, A.
1988 | Prüfung von Bentokies-Abdichtungen, Mitt. d. Inst. f.
Grundbau u. Bodenmechanik d. Univers. d. Bundeswehr,
1988 |
| Jansen, W.
Peuker, R.
Renz, K.
1985 | Strahlenschutz, Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und
Elektrotechnik, Eigenverlag, 106 S., Neufassung, Köln, 1985 |

- Jessberger, H.L.
1987a Abdichtungs- und Sanierungstechniken zum Schutz von Boden und Wasser - Deponien und Altlasten, VDI-Berichte Nr.628, S. 243, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1987
- Jessberger, H.L.
1987b Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., Die Bautechnik 64, H. 9, S. 289-303, 1987
- Kezdi, A.
1969 Handbuch der Bodenmechanik, Band 1, VEB-Verlag für Bauwesen, Berlin, 1969
- Knüpfen, J.
Reuter, E.
1987 Beispiele für Eignungsprüfungen und Güteüberwachungen von Abdichtungsmaterialien für Deponien, Mitt. d. Instituts f. Grundbau u. Bodenmechanik, TU Braunschweig, H. 23, S. 247, 1987
- Knüpfen, J.
1988 Qualitätssicherung mineralischer Deponiebasisabdichtungen mit Isotopensonnen, Baustoffrecycling + Deponietechnik, H. 9, 1988
- Kohler, E.E.
1986 Möglichkeiten der Beeinträchtigung der Wirksamkeit mineralischer Deponiebasisabdichtungen durch organische Lösungen, Fortschritte der Deponietechnik 1985, E. Schmidt Verlag, Berlin, 1986
- Kohler, E.E.
Morteani, G.
1984 Bewertung des Tonbarrierenkonzeptes unter besonderer Berücksichtigung der Permeabilität und den chemischen Reaktionen zwischen Tonmineralien und organischen Lösungen, Umweltbundesamt, FKZ 102 03 409/01, 1984

- Kreyszig, E.
1977 Statistische Methoden und ihre Anwendung, 6. Auflage,
Verlag Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen, 1977
- Kupke, P.
1979 Ermittlung empirischer Formeln für experimentiell gewon-
nene Daten, Das stationäre Mischwerk, H. 4, S. 5, 1979
- Leussink, H.
et al.
1972 Beitrag zur Kenntnis der bodenphysikalischen Eigenschaften
von Mischböden, Veröffentlichungen des Instituts für
Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Hoch-
schule Karlsruhe, Heft 15, 1964
- Lorenz, H.
1954 Über die Messung der Lagerungsdichte des Baugrundes
mittels radioaktiver Isotope, Baumaschine und Bautechnik
1, H. 8, S. 173, 1954
- Meseck, H.
Sondermann, W.
1987 Eignungsprüfung und Güteüberwachung, Beihefte zu Müll
und Abfall Nr. 24, S. 34, E. Schmidt Verlag, Berlin, 1987
- Meyer, H.G.
1986 Qualitätssicherung - eine neue Aufgabe im Bauwesen?, Die
Bautechnik 63, H. 7, S. 217-223, 1986
- Müller-Vonmoos, M.
Bucher, F.
Kahr, G.
Lang, H.-J.
1987 Einige grundsätzliche Überlegungen zur Abdichtung von
Deponien durch Ton, Mitt. d. Schweiz. Ges. f. Boden- u.
Felsmechanik Nr. 114, 1987
- Muhs, H.
1980 Baugrunduntersuchungen im Feld, in: Smolczyk, U.,
Grundbautaschenbuch 3. Auflage, 1. Teil, Verlag W. Ernst
& Sohn, 1980

- Muradi
1976
Beitrag zur Klärung der bodenmechanischen Eigenschaften künstlich verdichteter feinkörniger Böden, Dissertation, TU München, 1976
- Neff, K.-H.
1959
Über die Messung der Wasseraufnahme ungleichförmiger anorganischer Bodenarten in einer neuen Ausführung des Enslin-Gerätes, Die Bautechnik 44, H. 11, S. 415, 1959
- Neff, H.K.
1986
Versuchsbeschreibung des von Neff verbesserten Enslin-Versuchs, Erdbaulaboratorium ETN, Hungen, unveröffentlicht, 1986
- Neff, H.K.
1988
Der Wasseraufnahme-Versuch in der bodenphysikalischen Prüfung und geotechnische Erfahrungswerte, Bautechnik 65, H.5, S. 153, 1988
- N.N.
1968
Vorläufiges Merkblatt für die Durchführung von Probeverdichtungen, Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 1968
- N.N.
1969
Die geordnete Ablagerung (Deponie) fester und schlammiger Abfälle aus Siedlungen und Industrie, aufgest. im Auftrag von Bund und Ländern, Merkbl. Nr. 3, Bundesgesundheitsblatt, 12. Jahrg., Nr. 22, S. 362, Berlin, 1969
- N.N.
1975a
Merkblatt über die Anwendung radiometrischer Verfahren zur Bestimmung der Dichte und des Wassergehaltes von Böden, Forschungsges. f. d. Straßenwesen, AG Untergrund/Unterbau, 1975

- N.N.
1975b Prüfung von tongebundenen Formstoffen, Bestimmung des bindefähigen Tonanteils, Merkblatt P 35 des Vereins deutscher Giessereifachleute, 1975
- N.N.
1979 Die geordnete Ablagerung von Abfällen, Merkblatt M3 der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), Nieders. Min.Bl. Nr. 53, S. 1691-1702, 1979
- N.N.
1984 Arbeitsanleitung für den Einsatz radiometrischer Geräte für zerstörungsfreie Dichtemessungen auf bituminösen Schichten, Forschungsges. f. d. Straßenwesen, AG Asphalt- u. Teerstraßen, 1984
- N.N.
1986 Deponiebasisabdichtungen aus mineralischen Stoffen, Vorl.Verw.Vorschrift ü. d. Durchlässigkeitsbestimmung, RdErl. d. MURL NW, MinBl. NW Nr. 67, S. 1142-1143, 1986
- Ryley, M.D.
1969 The use of a microwave oven for the rapid determination of moisture content of soils, Road Research Laboratory Report LR 280, Crowthorne, Berkshire, 1969
- Sachs, L.
1974 Angewandte Statistik, 509 S., Springer-Verlag, Berlin, 1974
- Schuster, P.
1986 Experimentielle Untersuchungen über das Verhalten von Silt-Sand-Fractionen, die mit quellfähigem Ton verbessert wurden, Mitt. d. Inst. f. Grundbau u. Bodenmechanik d. ETH Zürich Nr. 131, Zürich, 1986

- Simons, H.
Geil, M.
Hänsel, W.
1982
- Tonige Stoffe zur Dichtung neuer und Sanierung alter Deponien, Vorträge der Baugrundtagung 1982, Braunschweig, 1982
- Steffen, H.
1981
- Möglichkeiten der Basisabdichtung von Mülldeponien unter besonderer Berücksichtigung zusammengesetzter, mineralischer Abdichtungen aus Erdbaustoffen, Vortrag auf der Südchemie-Fachtagung, Essen, 1981
- Stief, K.
1979
- Deponiebasisabdichtungen, Beihefte zu Müll und Abfall Nr. 15, E. Schmidt Verlag, Berlin, 1979
- Stief, K.
1987
- Anforderungen an Deponieabdichtungen, Beihefte zu Müll und Abfall Nr. 24, S. 9, E. Schmidt Verlag, Berlin, 1987
- Tankut, D.
1964
- Beiträge zur Dichteermittlung poröser Baustoffe unter besonderer Berücksichtigung bindiger Böden mit Hilfe radioaktiver Isotope nach der Rückstrahlmethode, Schriftenreihe d. Otto-Graf-Instituts der TH Stuttgart, Heft 17, 1964
- Wieden, P.
Pippich, J.
Hintsteiner, E.
1975
- Zerstörungsfreie Prüfung der Straße zum Zwecke der Kontrolle und Abnahme durch die Baubehörde, Bundesmin. f. Bauten u. Technik, Österreich, Straßenforschung H. 31, Wien, 1975

Bisher erschienene Mitteilungshefte des Instituts
für Grundbau und Bodenmechanik

- | | | |
|----------|--------------------------|--|
| Nr. 76-1 | Scheffler, E. | : Die abgesteifte Baugrube berechnet mit nichtlinearen Stoffgesetzen für Wand und Boden, 1976 |
| Nr. 78-2 | Frank, H. | : Formänderungsverhalten von Bewehrter Erde - untersucht mit Finiten Elementen, 1978 * |
| Nr. 79-3 | Schnell, W. | : Spannungen und Verformungen bei Fangedämmen, 1979 |
| Nr. 80-4 | Ruppert, F.-R. | : Bodenmechanische Eigenschaften der Lauenburger Serie - Ein Beispiel für Statistik in der Bodenmechanik, 1980 |
| Nr. 81-1 | Schuppener, B. | : Porenwasserüberdrücke im Sand unter Wellenbelastung auf Offshore-Bauwerken, 1981 * |
| Nr. 6 | Wolff, F. | : Spannungen und Verformungen bei Asphaltstraßen mit ungebundenen Tragschichten, 1981 |
| Nr. 7 | Bätcke, W. | : Tragfähigkeit gedrungener Körper im geneigten Halbraum, 1982 |
| Nr. 8 | Meseck, H
Schnell, W. | : Dichtungswände und -sohlen, 1982 * |



IGB-TUBS

- | | | |
|--------|------------------------------|--|
| Nr. 9 | Simons, H.
Ruppert, F.-R. | : Entwicklung geeigneter Verfahren zum Messen der physikalischen Eigenschaften von Bentonitsuspensionen auf Baustellen, 1982 * |
| Nr. 10 | Beckmann, U. | : Einflußgrößen für den Einsatz von Tunnelbohrmaschinen, 1982 |
| Nr. 11 | Papakyriakopoulos, P. | : Verhalten von Erd- und Steinschütt-dämmen unter Erdbeben, 1983 |
| Nr. 12 | Sondermann, W. | : Spannungen und Verformungen bei Bewehrter Erde, 1983 |
| Nr. 13 | Meseck, H. | : Sonderheft zum 10-jährigen Bestehen des Instituts, 1984 |
| Nr. 14 | Raabe, W. | : Spannungs-Verformungsverhalten überkonsolidierter Tone und dessen Abhängigkeit von ingenieurgeologischen Merkmalen, 1984 |
| Nr. 15 | Früchtenicht, H. | : Zum Verhalten nichtbindigen Bodens bei Baugruben mit Schlitzwänden, 1984 |
| Nr. 16 | Knüpfer, J.
Meseck, H. | : Schildvortrieb bei flüssigkeitsgestützter Ortsbrust, 1984 |
| Nr. 17 | N.N. | : Ablagerung umweltbelastender Stoffe, Fachseminar 06. - 07. Februar 1985, Braunschweig * |

- | | | |
|--------|---|--|
| Nr. 18 | Simons, H.
Reuter, E. | : Entwicklung von Prüfverfahren und Regeln zur Herstellung von Deponieabdichtungen aus Ton zum Schutz des Grundwassers, 1985 * |
| Nr. 19 | Meseck, H. | : Dynamische Pfahltests,
Fachseminar 23. - 24. Oktober 1985 |
| Nr. 20 | Meseck, H. | : Abdichten von Deponien, Altlasten und kontaminierten Standorten, Fachseminar 06. - 07. November 1986 * |
| Nr. 21 | Balthaus, H. | : Zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Pfählen mit dynamischen Pfahlprüfmethoden, 1986 |
| Nr. 22 | Kayser, R.
Meseck, H.
Rösch, A.
Hermanns, R. | : Untersuchungen zur Deponierung von Braunkohlenaschen, 1986 |
| Nr. 23 | Meseck, H. | : Dichtwände und Dichtsohlen
Fachseminar 02. - 03. Juni 1987 |
| Nr. 24 | Krause, Th. | : Schildvortrieb mit erd- und flüssigkeitsgestützter Ortsbrust, 1987 |
| Nr. 25 | Meseck, H. | : Mechanische Eigenschaften mineralischer Dichtwandmassen, 1987 |
| Nr. 26 | Reuter, E. | : Durchlässigkeitsverhalten von Tonen gegenüber anorganischen und organischen Säuren, 1988 |
| Nr. 27 | Wichert, H.-W. | : Der Einfluß der Alterung auf die Tragfähigkeit historischer Spick-Pfahl-Gründungen, 1988 |



IGB-TUBS

- | | | |
|--------|--|--|
| Nr. 28 | Geil, M. | : Untersuchungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Bentonit-Zement-Suspensionen im frischen und erhärteten Zustand, 1989 |
| Nr. 29 | Kruse, Th. | : Standsicherheit von Kombinationsabdichtungen auf Deponieböschungen, 1989 |
| Nr. 30 | Rodatz, W., u.a. | : Sonderheft zum 15jährigen Bestehen des Instituts, 1989 |
| Nr. 31 | Rodatz, W.
Beckefeld, P.
Sehrbrock, U., u.a. | : Standsicherheiten im Deponiebau / Schadstoffeinbindung durch Verfestigung von Abfällen, Fachseminar am 19./20. März 1990 in Braunschweig |

* = vergriffen