Mitteilung des Instituts
für Grundbau und Bodenmechanik
Technische Universität Braunschweig

Heft Nr. 46

IGB·TUBS

Zerstörungsfreie Meßverfahren zur Qualitätsprüfung mineralischer Dichtungen

von

Olaf Hemker

Braunschweig 1994

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

Vorwort des Herausgebers

Das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig befaßt sich seit vielen Jahren mit Problemstellungen des Deponiebaues in praktischer Tätigkeit in enger Zusammenarbeit mit Planern, Aufsichtsbehörden und Bauausführenden. Mit der wissenschaftlichen Bearbeitung von dabei sich ergebenden Fragestellungen hoffen wir, einen Beitrag zum Bau sicherer Deponien liefern zu können.

Mineralische Dichtungen werden zur Sicherstellung der langfristigen Wasserundurchlässigkeit in der Basis und auf der Oberfläche von Deponien hergestellt. Zur Beurteilung der Qualität einer mineralischen Dichtung wäre also deren Wasserdurchlässigkeit zu prüfen. Die Prüfung der Durchlässigkeit nimmt aber sehr viel Zeit in Anspruch, so daß andere Kriterien, die nachweislich mit der Wasserdurchlässigkeit korrelieren, herangezogen werden. Es sind dies die nach Proctorversuchen festgelegten Einbaukennwerte 'Wassergehalt' und 'Dichte'. Die für deren Ermittlung notwendigen Versuche, die zwar schnell genug durchgeführt werden können, haben zwei entscheidende Nachteile: Sie sind nicht zerstörungsfrei und nicht flächendeckend. Der letztere Punkt führt häufig zu Diskussionen, da die Übertragbarkeit auf die gesamte Bezugsfläche einer subjektiven Beurteilung unterliegt.

Ziel der Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Olaf Hemker war es daher, Verfahren zu untersuchen, die der Wunschvorstellung einer zerstörungsfreien und flächendeckenden Qualitätskontrolle näher kommen.

Er untersuchte ein radiometrisches Verfahren (Troxler-Sonde), das sowohl im Aufsetzbetrieb (zerstörungsfrei) als auch im Einstech-Betrieb (zerstörend) eingesetzt werden kann. Als weiteres Verfahren untersuchte er den Einsatz des dynamischen Plattendruckversuches (Leichtes Fallgewichtgerät). Der zerstörungsfreie Betrieb der Troxler-Sonde und das Leichte Fallgewichtgerät erwiesen sich unter eingegrenzten Randbedingungen als einsetzbar.

Generell konnte Herr Hemker feststellen, daß die Güte der zerstörungsfreien als auch der zerstörenden Qualitätsprüfung von der Homogenität und damit von der Aufbereitung des Dichtungsmaterials abhängig ist. Eine Überprüfung der zerstörungsfreien Meßverfahren auf vor Baubeginn anzulegenden Versuchsfeldern ist Voraussetzung für deren Einsatz.

Braunschweig, im Dezember 1994

Prof. Dr.-Ing. W. Rodatz

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

1. Einleitung **1**

1.1 Problemstellung 1

1.2 Ziel der Arbeit 2

1.3 Aufbau der Arbeit 2

2. Stand der Qualitätsprüfung mineralischer Dichtungen **4**

2.1 Allgemeines 4

2.2 Dichtungselemente im Deponiebau 4

2.3 Dichtungselemente im Wasserbau 11

3. Verdichtungsprüfung: Relevanz und Effektivität **13**

3.1 Zielgröße Dichtigkeit 13

3.1.1 Qualitätskriterium für die eingebaute Dichtschicht 13

3.1.2 Auswirkung von Fehlstellen 14

3.2 Zusammenhang Dichtigkeit/Verdichtung 15

3.3 Bewertung von Prüfmethodiken 18

3.3.1 Übersicht 18

3.3.2 Prüfung mit subjektiver Meßstellenauswahl 18

3.3.3 Prüfung nach statistischem Prüfplan 20

3.3.4 Flächendeckende Prüfverfahren 21

3.4 Diskussion und Optimierungsansatz 23

4. Zerstörungsfreie Meßverfahren **24**

4.1 Allgemeines 24

4.2 Radiometrische Meßverfahren 25

4.2.1 Übersicht 25

4.2.2 Bestimmung des Wassergehaltes 26

4.2.3 Bestimmung der Dichte 28

4.3 Statische Meßverfahren 29

4.3.1 Übersicht 29

4.3.2 Anwendbarkeit im Dichtungsbau 31

4.4 Dynamische Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer und dem Eigenschwingverfahren 32
4.4.1 Übersicht 32
4.4.2 Anwendbarkeit im Dichtungsbau 34
4.5 Dynamischer Plattendruckversuch mit Hilfe des Leichten Fallgewichtsgerätes 35
4.5.1 Übersicht 35
4.5.2 Prüfgeräte 36
4.5.3 Versuchsausführung 37
4.5.4 Lasteinwirkung in den Untergrund 37
4.5.5 Kalibrierung 38
4.5.5.1 Belastungsvorrichtung 38
4.5.5.2 Setzungsmeßeinrichtung 39
4.5.6 Anwendbarkeit 41
4.5.6.1 Grundsätzlich 41
4.5.6.2 Grenzwerte und Vergleichsuntersuchungen 41
4.5.6.3 Dichtungsbau 44
4.6 Folgerung 45

5. Messungen mit dem radiometrischen Verfahren 46

5.1 Allgemeines 46
5.2 Mineralisches Dichtungsmaterial 47
5.2.1 Klassifikation 47
5.2.2 Verdichtungseigenschaften 49
5.3 Aufbereitung im Feld 50
5.3.1 Herstellungsvorgang 50
5.3.2 Prüfumfang 50
5.3.3 Auswertung der Wassergehaltsmessungen 51
5.3.4 Auswertung der Dichtemessungen 54
5.4 Aufbereitung in stationärer Anlage 58
5.4.1 Herstellungsvorgang 58
5.4.2 Prüfumfang 58
5.4.3 Auswertung der Wassergehaltsmessungen 59
5.4.4 Auswertung der Dichtemessungen 61
5.5 Zusammenhang Dichtigkeit/Verdichtung 68
5.6 Bewertung des Prüfverfahrens 72

6. Messungen mit dem dynamischen Plattendruckversuch **74**

6.1 Allgemeines 74

6.2 Prüfung eines nichtbindigen Deponieauflagers 75

6.2.1 Untergrundmaterial 75

6.2.2 Versuchsausführung 75

6.2.3 Auswertung der Meßdaten 77

6.2.4 Fazit 78

6.3 Laborversuche an gemischtkörnigem Bodenmaterial unter idealen Bedingungen 79

6.3.1 Ziele und Vorgaben 79

6.3.2 Mineralisches Dichtungsmaterial 80

6.3.2.1 Vorbemerkung 80

6.3.2.2 Klassifikation 80

6.3.2.3 Verdichtungseigenschaften 81

6.3.2.4 Durchlässigkeit 81

6.3.3 Produktion und Nachweis idealer Prüfkörper 82

6.3.3.1 Vorbemerkung 82

6.3.3.2 Bodeneinbau in Prüftöpfen d = 100 cm und d = 45 cm 83

6.3.3.3 Vergleich der Ein- und Ausbaukennwerte 85

6.3.3.4 Durchlässigkeitsprüfungen 86

6.3.4 Durchführung der Plattendruckversuche 87

6.3.4.1 Versuchsausführung und Meßwertaufnahme 87

6.3.4.2 Betrachtungen zur Geschwindigkeitsmessung 88

6.3.4.3 Betrachtungen zur Tiefenwirkung 89

6.3.5 Auswertung nach TP BF - StB, Teil 8.3 90

6.3.6 Auswertung aller Meßdaten 92

6.3.6.1 Setzungsamplituden und plastische Setzungen in der Gesamtbilanz 92

6.3.6.2 Einfluß der Trockendichte bei optimalem Wassergehalt 95

6.3.6.2.1 Definition des Analysesektors 95

6.3.6.2.2 Setzungsverläufe 95

6.3.6.2.3 Signifikanz der 95%-igen Verdichtung 98

6.3.6.3 Einfluß des Sättigungszustandes 101

6.3.7 Vergleichsuntersuchungen 102

6.3.8 Fazit 104

6.4 Feldversuche an mineralischen Dichtungen 107
6.4.1 Übersicht 107
6.4.2 Versuche am Sand-Ton-Gemisch 107
6.4.2.1 Klassifikation 107
6.4.2.2 Verdichtungseigenschaften 108
6.4.2.3 Meßergebnisse 108
6.4.3 Versuche am Ton-Material 110
6.4.3.1 Klassifikation 110
6.4.3.2 Verdichtungseigenschaften 111
6.4.3.3 Meßergebnisse 111
6.4.4 Fazit 113
6.5 Bewertung des Prüfverfahrens 113

7. Schlußbemerkungen und Empfehlungen 115

Literaturverzeichnis 121

Synopsis 131
Non-destructive tests for the quality assessment of mineral liners

BEZEICHNUNGEN

d	Schichtdicke
D_{Pr}	Verdichtungsgrad
E	Elastizitätsmodul
E_v	Verformungsmodul
E_{vd}	dynamischer Verformungsmodul
F_S	Stoßkraft
i	hydraulische Gefälle
I_C	Konsistenzzahl
I_P	Plastizitätszahl
k	Durchlässigkeitsbeiwert (Laborversuch)
k_f	Gebirgsdurchlässigkeitsbeiwert
m	Masse
n	Anzahl der Meßpunkte
n_a	Luftporengehalt
r	Radius
s	Setzung
S_r	Sättigungszahl
t	Tiefe
T	Temperatur
U	Ungleichförmigkeitszahl
V	Volumen
V_{Ca}	Kalkgehalt
V_{gl}	Glühverlust
w	Wassergehalt
w_b	Wasseraufnahmevermögen
w_L	Fließgrenze
w_P	Ausrollgrenze
w_{Pr}	optimale Wassergehalt
$w_{0,95Pr}$	Wassergehalt bei $D_{Pr} = 0,95$ (nasse Seite)
Δ	Differenz
ρ_d	Trockendichte
ρ_{Pr}	Proctordichte
$\rho_{0,95Pr}$	Trockendichte bei $D_{Pr} = 0,95$ (nasse Seite)
ρ_s	Korndichte
σ	Normalspannung

1. EINLEITUNG

1.1 Problemstellung

Mineralische Dichtungen sind die für die langfristige Funktionstüchtigkeit moderner Deponie- und Wasserbauwerke entscheidenden Komponenten. Intensive qualitätssichernde Maßnahmen von der Planungsphase bis zur Ausführung müssen eine erfolgreiche Herstellung gewährleisten.

Neben einem je nach Einsatzzweck unterschiedlich umfangreichen Anforderungskatalog an die Eigenschaften der mineralischen Dichtungsstoffe ist bei möglichst optimierten bautechnischen Bedingungen eine bestimmte Dichtigkeit der eingebauten Dichtungsschichten zu erreichen und aus Umweltschutzgründen auch zu fordern.

Im Zusammenhang mit der Qualitätsprüfung eingebauter Dichtungsschichten ist zur Abnahme von Teilflächen als Voraussetzung für einen zügigen Baufortschritt das Hauptkriterium 'Durchlässigkeit' im Regelfall nicht zeitgerecht quantifizierbar, so daß die Einbaukennwerte 'Wassergehalt und Dichte' maßgebend sind. Als Meßmethode werden üblicherweise das Ausstechzylinderverfahren nach DIN 18125, T.2 in Verbindung mit der Schnelltrocknung im Mikrowellenherd nach DIN 18121, T.2 und das radiometrische Meßverfahren eingesetzt (s.a. KNÜPFER, 1990).

Beide Verfahren sind als nicht zerstörungsfrei einzustufen und nur punktuell einsetzbar. Die Beurteilung der Übertragbarkeit des Meßergebnisses auf eine jeweils festzulegende Bezugsfläche und der Güte der fachgerechten Verschließung der Prüfstellen obliegen der visuellen Prüfung durch die Überwachungspersonen. Selbst bei dem unverzichtbaren Einsatz geotechnisch qualifizierter Fachkräfte handelt es sich stets um subjektive Qualitätseinschätzungen, die oft Gegenstand angeregter Diskussionen und Anlaß für Nachprüfungen sind. Ein wesentlicher Einflußfaktor besteht dabei zweifellos in den Eigenschaften und der Qualität der Aufbereitung bzw. der Homogenität des Dichtungsmaterials vor dem Verdichtungsprozeß.

Im Interesse einer objektiven bzw. realistischeren Beurteilung von Dichtungsqualitäten steht die Entwicklung von sinnvollen Ergänzungen bestehender Prüfmethodiken durch zerstörungsfreie, netzverdichtende Zusatzuntersuchungen oder von grundsätzlich neuen Prüfmethoden mit ausreichender Aussagesicherheit, wie z.B. walzenintegrierte Meßsysteme bei nichtbindigen Bodenmaterialien (GRABE, 1992). Besonders für die Prüfung von Deponiebasisflächen sind in Anbetracht des großen Bedarfes, gegebenenfalls sind sogar künstliche mineralische Barrieren einzubauen (bei 3 m Mächtigkeit und 25 cm Lagendicke immerhin 12 Lagen), und der Tatsache, daß die Basisdichtungssysteme nach Abfalleinlagerung weder unmittelbar kontrollierbar noch praktisch reparierbar sind, Verbesserungen wünschenswert.

1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel der Untersuchungen war es, die Möglichkeiten des praktischen Einsatzes zerstörungsfreier Meßverfahren, die gleichzeitig nur einen geringen Zeitaufwand in Anspruch nehmen und folglich weitestgehend flächendeckend arbeiten, im Rahmen von Qualitätsprüfungen eingebauter mineralischer Dichtschichten zu analysieren bzw. zu entwickeln. Als Ergebnis sollten Empfehlungen für eine verbesserte Güteüberwachung erarbeitet werden. Damit wäre die Grundlage für eine objektivere Entscheidung über Flächenfreigaben gegeben und in Anbetracht beträchtlicher Auswirkungen bereits kleiner Fehlstellen im Dichtungssystem ein wesentlicher Beitrag zur Erhöhung der Gesamtsicherheit des Bauwerks geleistet.

1.3 Aufbau der Arbeit

Im ersten Teil der Arbeit wird der aktuelle Stand der Anforderungen an mineralische Dichtungsmaterialien und eingebaute Dichtschichten mit Schwerpunkt auf der Qualitätsprüfung der Einbauparameter aufgezeigt. Art und Umfang konventioneller Untersuchungsmethoden werden gegenübergestellt.

Im Mittelpunkt des zweiten Teils steht der Zusammenhang zwischen der eigentlichen Zielgröße Dichtigkeit und den über Verdichtungsprüfungen unmittelbar bestimmbaren Einbauparametern. Vor dem Hintergrund einer für die Gesamtsicherheit erforderlichen flächendeckenden hohen Qualität werden unter dem Aspekt der Zuordnung Meßstelle → Bezugsfläche verschiedene Prüfmethodiken analysiert und ein Optimierungsansatz auf der Basis zerstörungsfreier prüfrasterverdichtender Zusatzuntersuchungen erarbeitet.

Grundsätzliche Möglichkeiten zerstörungsfreier Untersuchungen werden - eingeteilt in die Kategorien radiometrische, statische und dynamische Meßverfahren - im dritten Teil vorgestellt und deren Anwendbarkeit im Dichtungsbau diskutiert.

Der experimentelle Teil der Arbeit gliedert sich verfahrensabhängig in zwei Abschnitte:

Für den Einbau eines leicht plastischen Tons als Basisabdichtung einer Hausmülldeponie werden die Ergebnisse von ca. 1.200 Messungen mit dem radiometrischen Verfahren, die sowohl im zerstörungsfreien als auch im konventionellen zerstörenden Betrieb erzielt wurden, vergleichend gegenübergestellt, ausgewertet und diskutiert.

Im Rahmen der Eignungsuntersuchung eines dynamischen Meßverfahrens wird die Einsatzmöglichkeit des dynamischen Plattendruckversuches mit Hilfe des Leichten Fallgewichtsgerätes geprüft. In umfangreichen Laboruntersuchungen werden für ein Sand-Ton-Gemisch grundsätz-

liche Abhängigkeiten der erzielbaren Parameter von fest definierbaren Einbauzuständen in speziellen Prüftöpfen erarbeitet. Die Übertragbarkeit der idealen Laborverhältnisse auf die realen in situ - Verhältnisse wird daraufhin abgeschätzt und stichprobenartig für verschiedene Dichtungsmaterialien nachgewiesen.

Abschließend werden aufgrund der mit den eingesetzten zerstörungsfreien Meßverfahren erzielten Ergebnisse Empfehlungen für eine optimierte Einbauqualität des Dichtungsmaterials und Hinweise für den praktischen Umgang mit den zerstörungsfreien Untersuchungen erarbeitet.

(Hinweis: Die Darstellung des Aufbaus und der wesentlichen Ergebnisse der Arbeit zeigt in übersichtlicher Form das Ablaufdiagramm Bild 68 in Kapitel 7.)

2. STAND DER QUALITÄTSPRÜFUNG MINERALISCHER DICHTUNGEN

2.1 Allgemeines

Die Qualitätssicherung mineralischer Dichtungen ist von besonderer Bedeutung, weil nach der Inbetriebnahme eines abgedichteten Bauwerks in den meisten Fällen eine unmittelbare Kontrollierbarkeit und Reparierbarkeit, z.B. bei Deponiebasisabdichtungen, praktisch nicht möglich ist. Eine ordnungsgemäße Qualitätssicherung muß daher gewährleisten, daß die nach dem aktuellen Stand der Technik festgelegten Qualitätskriterien eingehalten werden.

Für den Einsatz mineralischer Dichtungen im Deponie- und Wasserbau sind nachfolgend in einer repräsentativen Auswahl aktueller Regelwerke die wesentlichen Anforderungen tabellarisch gegenübergestellt. Im Mittelpunkt steht die Qualitätsprüfung einer bereits eingebauten Dichtschicht. Eignungsprüfungen gemäß den Vorschriften bzw. Erfordernissen und fachgerechte baubegleitende Kontrollen an der Abbaustelle werden vorausgesetzt und sind an dieser Stelle von untergeordneter Bedeutung.

2.2 Dichtungselemente im Deponiebau

An die Herstellung mineralischer Dichtschichten moderner Deponiebauwerke werden sehr hohe Anforderungen gestellt. Um mögliche Material- und Ausführungsfehler weitestgehend zu vermeiden und damit die Gesamtsicherheit zu erhöhen, sind detaillierte Erläuterungen zu Planung, Eignungsprüfung der Baustoffe, Bauausführung und intensiven Qualitätssicherungsmaßnahmen wesentlicher Bestandteil verschiedener Regelwerke, u.a. (in Klammern die in dieser Arbeit verwendeten Kurzbezeichnungen):

- Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall)
  Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen in der ab 1. April 1991 geltenden Fassung
- Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall)
  Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen, 1993
- Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" - GDA (GDA-Empfehlungen)
  Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau, 1993

  (Hinweis: Die GDA-Empfehlungen stellen eine geotechnische Ergänzung zu TA Abfall und TA Siedlungsabfall dar.)

- Mineralische Deponieabdichtungen - Richtlinie - (NRW-Richtlinie)
  Landesamt für Wasser und Abfall NRW, August 1993
- Durchführung des Abfallgesetzes; Abdichtung von Deponien für Siedlungsabfälle
  RdErl. d. MU v. 24.06.1988 - 207-62812/21 -, - GültL 30/36 - (RdErl. Nds.)
  Nds. MBl. Nr. 22/1988
  (Hinweis: Der RdErl. Nds. bezieht sich ausschließlich auf Basisabdichtungen.)
- Empfehlungen zur Herstellung einer künstlichen mineralischen Barriere bei Deponien
  Anforderungen an Material, Einbau und Prüfung (NLfB-Empfehlungen)
  Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung NLfB, März 1992

Für Deponiebasis - und Deponieoberflächenabdichtungen sind die im Zusammenhang mit den Untersuchungen in dieser Arbeit relevanten Vorgaben in Tabelle 1 gegenüberstellt. Es handelt sich um Anforderungen an mineralisches Dichtungsmaterial (klassifizierende Parameter, Aufbereitungs-, Einbau- und Verdichtungsmethodik) - Tabelle 1 a -, die eingebaute Dichtschicht (Geometrie und Einbauparameter) - Tabelle 1 b - und die Qualitätsprüfung der eingebauten Dichtschicht - Tabelle 1 c -. Diese Qualitätskontrollen umfassen die während und unmittelbar nach dem Einbau erforderlichen optischen Beurteilungen und Dichteprüfungen (incl. Wassergehaltskontrollen) als Grundvoraussetzung für den weiteren Bauablauf.

Der Deponieuntergrund bzw. das Deponieauflager muß die Anforderungen an die Materialeigenschaften, den Mindestverdichtungsgrad und die Qualitätsprüfung nach Tabelle 2 erfüllen. Für Ausgleichs- und Tragschichten bei Oberflächenabdichtungen ist i.d.R. ebenfalls eine Qualitätsprüfung dieses Mindestumfangs zu gewährleisten.

Künstliche mineralische Dichtungen von mindestens 3 m Dicke sind gemäß

- Durchführung des Abfallgesetzes; Anforderungen an Deponiestandorte für Siedlungsabfälle
  RdErl. d. MU v. 27.11.1991 - 504-62812/21 B -, - GültL 30/56 -
  Nds. MBl. Nr. 3/1992

unter bestimmten Voraussetzungen vorzusehen. Ausführliche Erläuterungen zum Dichtungsmaterial, den einzubauenden Dichtschichten und deren Qualitätsprüfung enthalten o.a. NLfB-Empfehlungen, s.a. Tabelle 3. Für das Planum dieser Barrieren ist ein Verdichtungsgrad von $D_{Pr} \geq 0{,}95$ einzuhalten. Der Nachweis ist durch Dichteprüfung nach DIN 18125, T.2 oder ersatzweise mit Lastplattenversuchen nach DIN 18134 alle 5.000 m^2, jedoch mindestens 3 x je Teilfläche, zu erbringen.

	TA Abfall bzw. TA Siedlungsabfall	GDA-Empfehlungen	NRW-Richtlinie	RdErl. Nds.
Mineralisches Dichtungsmaterial				
Feinstkornanteil < 2 µm Tonmineranteil organische Substanz Karbonatanteil	≥ 20 Gew.-% ≥ 10 Gew.-% (nur Basisabd.) ≤ 5 Gew.-% ≤ 15 Gew.-%		≥ 10 Masse-% ≤ 10 Masse-% (im Feinkornbereich) ≤ 10 Masse-% (bei kalkaggressivem Sickerwasser) - alle Angaben für Basisabdichtung -	≥ 15 Gew.-% > 50 % des Feinstkornanteils ≤ 15 Gew.-% ≤ 20 Gew.-% i.M. (Kalziumkarbonat)
Aufbereitung	Homogenisierung oder Einmischen von Feinkornzugaben in Zwangsmischern (mixed in plant)	Bei Einmischdichtungen in den anstehenden oder aus dem angelieferten Boden sind zusätzlich die Menge und die gleichmäßige Verteilung des aufgebrachten Zusatzstoffes in einem Raster zu prüfen.	Zur Sicherstellung der Homogenität des mineralischen Abdichtungsmaterials ist eine maschinelle Aufbereitung erforderlich (z.B. im Zwangsmischer, s. TA Abfall). Eine ausreichende Homogenität ist dann gegeben, wenn im aufbereiteten und eingebauten Zustand bei den Parametern Wassergehalt, Kornanteile und Tonmineralanteil eine im Rahmen der Eignungsprüfung festzulegende Streubreite nicht überschritten wird. im Einzelfall ohne Aufbereitung, wenn Gleichwertigkeit nachgew.	Zur Erreichung einer homogeneren Dichtungsmasse ist das Material entsprechend zu behandeln, z.B. zu zerkleinern, zu mischen oder zu fräsen.
	Bodenstücke ≤ 32 mm		Aggregatgröße ≤ 32 mm (feinkörnig), Korndurchmesser d < 32 mm (gemischtkörnig)	Bodenstücke ≤ 32 mm
Einbau und Verdichtung			bisher im Erdbau bewährte dynamisch und statisch wirksame Geräte einzeln oder in Kombination	Zu verdichten ist mit walkenden, stampfenden Geräten.
	auf Böschungen steiler 1 : 2,5 i.d.R. in horizontalen Lagen (nur Basisabdichtung)		im Regelfall böschungsparallel (bis etwa 1 : 2,5 möglich) steiler: in horizontalen Lagen	

Tabelle 1 a: Anforderungen an mineralisches Dichtungsmaterial für Deponiebasis- und Deponieoberflächenabdichtungen

	TA Abfall bzw. TA Siedlungsabfall	GDA-Empfehlungen	NRW-Richtlinie	RdErl. Nds.
Eingebaute Dichtschicht				
Gesamtdicke Basisabdichtung Oberflächenabdichtung	 ≥ 1,5 m bzw. ≥ 0,50 m (Deponieklasse I) oder ≥ 0,75 m (Deponieklasse II) ≥ 0,5 m			≥ 0,75 m
Lagendicke	i. d. R. ≤ 0,25 m		≤ 0,25 m (feinkörnige Böden)	≤ 0,25 m
Quergefälle* (Basisabdichtung) Längsgefälle* (Basisabdichtung) Gefälle* (Oberflächenabdichtung)	≥ 3 % ≥ 1 % ≥ 5 %			≥ 3 % ≥ 1,5 %
Einbauwassergehalt	$w_{Pr} < w < w_{0,95\ Pr}$			$w_{Pr} < w < w_{0,95\ Pr}$
Verdichtungsgrad	$D_{Pr} > 95$ %		$D_{Pr} \geq 95$ %	$D_{Pr} > 95$ %
Luftporengehalt	$n_a \leq 5$ % (bei $w \leq w_{Pr}$)		$n_a \leq 5$ % (zusätzlich bei gemischtkörnigen Böden: Porenanteil n < 25 %)	$n_a \leq 5$ % (bei $w \leq w_{Pr}$)
Durchlässigkeitsbeiwert (Laborwert) Basisabdichtung Oberflächenabdichtung	 $k \leq 5 \cdot 10^{-10}$ m/s (i = 30) $k \leq 5 \cdot 10^{-10}$ m/s (i = 30) bzw. $k \leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s (i = 30)		 $k \leq 1 \cdot 10^{-10}$ m/s (i = 30) $k \leq 1 \cdot 10^{-10}$ m/s (i = 30)	$k \leq 5 \cdot 10^{-10}$ m/s (i = 30)
Plastizität			mindestens mittelplastisch, $w_L \geq 35$ % (feinkörnige Böden)	
Konsistenz		steif	steif, $0,75 \leq I_c \leq 1,0$ (feinkörnige Böden)	

Tabelle 1 b: Anforderungen an eingebaute Dichtschichten für Deponiebasis- und Deponieoberflächenabdichtungen (* nach Abklingen der Setzungen des Dichtungsauflagers)

	TA Abfall bzw. TA Siedlungsabfall	GDA-Empfehlungen	NRW-Richtlinie	RdErl. Nds.
Qualitätsprüfung eingebauter Dichtschichten				
visuell	Homogenität gleichmäßiger Einbauwassergehalt Verzahnung der Lagen Oberfläche jeder Lage		Homogenität Ebenflächigkeit der Schichtflächen Anzahl der Walzübergänge Gleichmäßigkeit der Verdichtung fehlerfreier Verbund der Lagen Oberfläche	Homogenität gleichmäßiger Einbauwassergehalt nach dem Einbau unzerkleinerte Bodenstücke ≤ 32 mm fehlerfreier Verbund der Lagen Oberfläche
Dichteprüfung	alle 1.000 m^2 je Lage - mindestens an 3 verschiedenen Stellen - nach DIN 18 125, Teil 2 im unteren Drittel der Lage; beim Böschungseinbau in horizontalen Lagen alle 30 m je Lage Die Dichte kann in einem Überwachungsschritt (Eigen- oder Fremdüberwachung) ersatzweise nach Kalibrierung mit einer radiometrischen Sonde im Rasterabstand 15 x 15 m bestimmt werden.	anhand von Proben bzw. zerstörungsfreien Messungen	im Raster von 30 x 30 m je Lage durch Eigen- und Fremdprüfung im unteren Drittel der Lage; Verdichtungsprüfung anhand von Proben bzw. zerstörungsfreien Messungen: a) feinkörniges Material: Sonderproben der Klasse 1 b) gemischtkörniges Material: Ersatzmethoden nach DIN 18 125, Teil 2 - Einsatz des radiometrischen Meßverfahrens möglich - Entnahme von Kernen über die Gesamtmächtigkeit der Abdichtung möglich	Sohle und Böschungen, auf denen die Dichtung noch böschungsparallel eingebaut werden kann: je 1.000 m^2 einmal im unteren Drittel der jeweiligen Lage, jedoch je Teilfläche mindestens dreimal nach DIN 18 125, T2 oder, falls kalibriert, mit der radiometrischen Sonde im Rasterabstand von 15 x 15 m. Steilere Böschungen oder Wände, bei denen die Dichtungsschicht in horizontalen Lagen (Kassetten) eingebaut worden ist: je 50 m^3 eingebaute Dichtungsschicht einmal nach DIN 18 125, T 2. Zur besseren Aussage über den flächenhaften Verdichtungserfolg sollen die Verdichtungsgeräte mit Verdichtungsanzeigegeräten ausgestattet sein. Proctorversuch: je Teilfläche und Lage je einmal, jedoch mind. alle 5.000 m^2
Durchlässigkeitsprüfung (Labor)	Alle 1.000 m^2 je Lage - mindestens an 3 verschiedenen Stellen - sind Proben zu entnehmen und die Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18 130, Teil 1 zu untersuchen.	Mindestprüfungsumfang: 1 x je 2.000 m^2 je Lage	im Raster von 60 x 60 m je Lage durch Eigen- und Fremdpüfung	Die Häufigkeit der durchzuführenden Bestimmungen hängt vom verwendeten Dichtungsmaterial ab und ist deshalb gesondert festzulegen.

Tabelle 1 c: Anforderungen an die Qualitätsprüfung eingebauter Dichtschichten für Deponiebasis - und Deponieoberflächenabdichtungen

	TA Abfall	TA Siedlungsabfall	NRW - Richtlinie
Material	natürlicher Untergrund: Mindestmächtigkeit 3 m; hohes Adsorptionsvermögen, i.d.R. erfüllt, wenn $k_f \leq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s zusätzliche technische Maßnahmen: Auffüllung mit mind. 10 Gew.-% Tonmineralen	natürlicher Untergrund (geologische Barriere) bei Deponieklasse II: schwach durchlässiges Locker- bzw. Festgestein von mehreren Metern mit hohem Schadstoffrückhaltepotential zusätzliche technische Maßnahmen bei Deponieklasse II: Einbau einer homogenen Ausgleichsschicht bis 3 m unter Deponieplanum mit $k_f \leq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s	natürlich anstehender Boden oder künstlich aufgebrachtes, ggf. vergütetes mineralisches Material
Verdichtungsgrad	$D_{Pr} \geq 95$ %	nach ZTVE, Tabelle 4 (Deponieklasse I und II)	$D_{Pr} \geq 95$ % Verformungsmodul gemäß den Ergebnissen der Versuchsfelder
Qualitätsprüfung visuell Dichteprüfung	 Oberfläche alle 1.000 m² - mindestens an 3 verschiedenen Stellen - nach DIN 18 125, Teil 2; ersatzweise durch Plattendruckversuche nach DIN 18 134 und ZTVE-StB 76/78		 Oberfläche alle 1.000 m², jedoch mindestens dreimal je Teilfläche

Tabelle 2: Anforderungen an die Materialeigenschaften, den Verdichtungsgrad und die Qualitätsprüfung des Deponieuntergrundes bzw. Deponieauflagers

	NLfB-Empfehlungen
Mineralisches Dichtungsmaterial	
Tonmineralanteil	≥ 10 %
organ. Anteil (feinst verteilt)	≤ 15 %
Kalziumkarbonatanteil	≤ 30 %
Aufbereitung	Wird das Material vorher homogenisiert, z.B. durch Mischen in einem Zwangsmischer oder durch Fräsen auf Mieten, brauchen die eingebrachten Schichten nur dann gefräst zu werden, wenn dies zum Erreichen der Kleinstückigkeit (≤ 32 mm) zum Zeitpunkt des Einbaus erforderlich ist.
Einbau und Verdichtung	Zu verdichten ist mit walkenden, stampfenden Geräten.
Eingebaute Dichtschicht	
Gesamtdicke	≥ 3,0 m
Lagendicke	≤ 0,3 m
Verdichtungsgrad	$D_{Pr} \geq 0{,}95$
Durchlässigkeitsbeiwert (Laborwert)	$k \leq 1 \times 10^{-8}$ m/s
Qualitätsprüfung eingebauter Dichtschichten	
visuell	Homogenität, gleichmäßiger Wassergehalt, Bodenstücke ≤ 32 mm, Oberfläche
Dichte/Verdichtungsgrad	1 x je 5.000 m^2 (mind. jedoch 1 x je Teilfläche)
Wassergehalt	1 x je 2.500 m^2 (mind. jedoch 3 x je Teilfläche)
Proctordichte	1 x je 10.000 m^2 (mind. jedoch 1 x je Teilfläche)
Durchlässigkeitsbeiwert	1 x je 5.000 m^2 (mind. jedoch 3 x je Teilfläche)

Tabelle 3: Anforderungen an das mineralische Dichtungsmaterial, eingebaute Dichtschichten und an die Qualitätsprüfung eingebauter Dichtschichten für künstliche mineralische Barrieren

2.3 Dichtungselemente im Wasserbau

Im Wasserbau werden u.a. natürliche und aufbereitete Erddichtungen als Dichtungselemente auf horizontalen oder geneigten Flächen sowie als Kerndichtungen in Dämmen und Deichen eingesetzt. Das Dichtungsmaterial besteht aus natürlichen Böden oder aus bindemittelfreien Mischungen mehrerer Böden oder Zuschläge.

Grundsätzliche Empfehlungen für Planung, Bau und Prüfung von Dichtungselementen im Wasserbau veröffentlichte der Fachausschuß "Dichtungselemente im Wasserbau" des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK) in

- Dichtungselemente im Wasserbau
  DVWK-Merkblatt 215/1990.

Eine Zusammenstellung der Anforderungen an natürliche oder aufbereitete Erddichtungen enthält Tabelle 4.

Mineralische Sohldichtungen unter Wasser, gegebenenfalls auch unter laufendem Schiffsverkehr, sind in diesem Zusammenhang nicht von Bedeutung, s. hierzu Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" - Häfen und Wasserstraßen (EAU, 1990) und SCHULZ (1987).

	DVWK-Merkblatt 215/1990
Mineralisches Dichtungsmaterial	
Aufbereitung	mixed-in-place oder mixed-in-plant Eine ausreichende Homogenisierung des Bodens mit zugegebenem Wasser liegt bei einem Schwankungsbereich des Wassergehaltes der untersuchten Proben von $w \leq 1$ % vor.
Eingebaute Dichtschicht	
Gesamtdicke	Bei horizontalen Dichtungselementen darf die Mindestdicke eines Dichtungselementes 20 cm nicht unterschreiten, bei mehreren Lagen des Dichtungselementes mindestens 15 cm je Einzellage
Einbauwassergehalt	vorzusehen ist: $w > w_{Pr}$
Verdichtungsgrad	vorzusehen ist: $95\ \% \leq D_{Pr} \leq 100\ \%$ Der vorgesehene Verdichtungsgrad muß von 95 % der Proben überschritten werden; die Proben, die ihn nicht erreichen, dürfen höchstens 3 % darunter liegen.
Durchlässigkeitsbeiwert (Laborwert)	natürl. Erddichtung: $k \leq 10^{-7}$ m/s (i = 10) mindestens aufbereitete Erddichtung: 10^{-8} m/s $> k > 10^{-10}$ m/s (i = 10) kann erreicht werden
Qualitätsprüfung eingebauter Dichtschichten	Die Eigenüberwachungs- und Kontrollprüfungen können auf die Prüfung des Wassergehaltes w, des Verdichtungsgrades D_{Pr}, des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes k und bei Anordnung von Filterschichten der Korngrößenverteilung beschränkt werden.

Tabelle 4: Vorgaben an mineralische Dichtungsmaterialien, eingebaute Dichtschichten und an die Qualitätsprüfung eingebauter Dichtschichten für Dichtungselemente aus natürlichen oder aufbereiteten Erddichtungen im Wasserbau

3. VERDICHTUNGSPRÜFUNG: RELEVANZ UND EFFEKTIVITÄT

3.1 Zielgröße Dichtigkeit

3.1.1 Qualitätskriterium für die eingebaute Dichtschicht

Die mineralische Dichtung ist als das maßgebende Sicherheitselement für die Gewährleistung einer den Anforderungen entsprechenden langfristigen Funktionstüchtigkeit von Dichtungsbauwerken anzusehen.

Die allgemeinen Anforderungen an das Dichtungsmaterial und die eingebaute Dichtschicht sind bodenphysikalischer,

- Klassifikation,
- Verdichtungseigenschaften,
- Durchlässigkeit,
- Festigkeit,
- Zusammendrückbarkeit,
- hydraulische Stabilität,

und mineralogischer/chemischer

- Korngrößenverteilung (chemische Lösung der Kornbindungen),
- Mineralbestand,
- Kationenaustauschkapazität,
- chemische Zusammensetzung,

Natur. Einerseits ist eine möglichst geringe Durchlässigkeit gegenüber Wasser und Schadstoffen (z.B. Deponiebasisdichtungen) entscheidend, andererseits dürfen die Inhaltstoffe der Sickerwässer keine nachteiligen Änderungen in Mineralbestand, chemischer Zusammensetzung und physikalischen Eigenschaften bewirken.

Der für die grundsätzliche Einsetzbarkeit des vorgesehenen Dichtungsmaterials erforderliche Nachweis beinhaltet

- die Eignungsprüfung — zur labormäßigen Analyse der bodenphysikalischen und mineralogischen/chemischen Parameter und
- die Versuchsfelder — zur Bestimmung der Einbaukriterien.

Diese Untersuchungsergebnisse sollten rechtzeitig <u>vor</u> Baubeginn vorliegen.

<u>Während</u> der Baumaßnahme sind die maßgebenden Parameter

HOMOGENITÄT und DICHTIGKEIT

als Folge gezielter Verdichtungsarbeit nachzuweisen. Sie bilden die wesentlichen Qualitätskriterien für die eingebaute Dichtungsschicht. Das Maß der Dichtigkeit ist mit geeigneten Prüfeinrichtungen quantitativ bestimmbar.

3.1.2 Auswirkung von Fehlstellen

Eine fachgerechte Bauausführung gemäß den Anforderungen eines Qualitätssicherungsplanes ist unerläßlich, da bereits kleine Fehlstellen, Teilflächen mit höherer Durchlässigkeit, zu einer signifikanten Beeinträchtigung der Gesamtqualität eines Dichtungsabschnittes führen.

Beispiel (s. Bild 1):

Geht man unter idealisierten Bedingungen davon aus, daß für eine Lage mineralischer Dichtung der Durchlässigkeitsbeiwert $k = 1 \cdot 10^{-10}$ m/s beträgt mit Ausnahme der Teilfläche A* mit einem 5-, 10-, 50- oder 100-fach höheren Durchlässigkeitsbeiwert k*, so ergibt sich der Durchlässigkeitsbeiwert k der Gesamtfläche A nach Bild 1 auf Basis einzelner, parallelgeschalteter Flächen. Damit wird beispielsweise bei einem Flächenteil von A* = 20 % mit einem Durchlässigkeitsbeiwert $k^* = 5 \cdot 10^{-10}$ m/s die Gesamtdurchlässigkeit nahezu verdoppelt und bei einem Anteil A* = 8 % mit $k^* = 5 \cdot 10^{-9}$ m/s der Grenzwert $k = 5 \cdot 10^{-10}$ m/s (Kap. 2) bereits erreicht.

(Anmerkung: In situ besteht bei Mehrlagigkeit des Einbaus mineralischer Dichtungen und bei einem gegenüber Laborversuchen oftmals deutlich geringeren hydraulischen Gefälle eine erhebliche Sicherheitsreserve.)

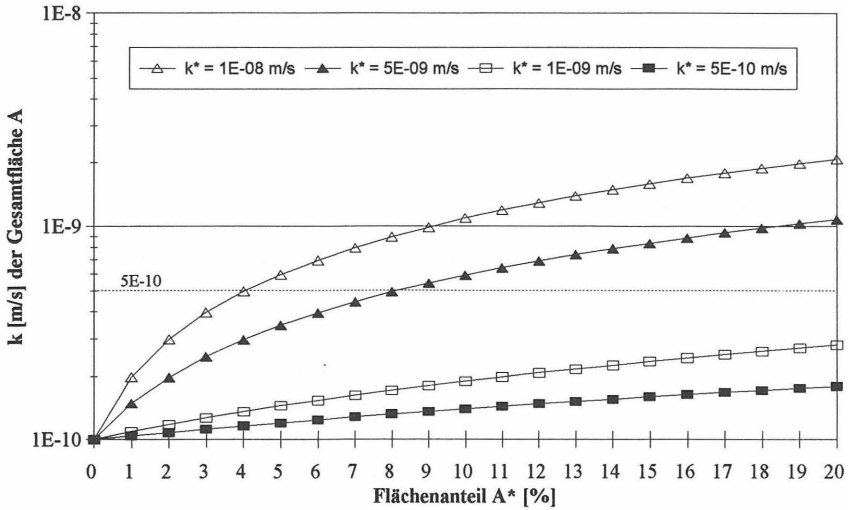


Bild 1: Auswirkung von Fehlstellen auf die Durchlässigkeit einer Gesamtfläche

3.2 Zusammenhang Dichtigkeit/Verdichtung

Zur Quantifizierung der Dichtigkeit werden aus der eingebauten mineralischen Dichtung Proben entnommen und in Laborprüfeinrichtungen Durchlässigkeitsbeiwerte (k-Werte) bestimmt (s. Kap. 2). Dazu wird in der NRW-Richtlinie [5] ausgeführt:

> "Da die Wasserdurchlässigkeitsversuche längere Zeit in Anspruch nehmen, sollten im Versuchsfeld Regressionen zwischen den k-Werten und anderen Materialkennwerten wie Verdichtung, Wassergehalt, Zustandsgrenzen etc. hergeleitet werden, anhand derer bei der Herstellung der Abdichtungsschicht die Qualität der eingebauten Lage beurteilt werden kann. Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche sind bei einer zu beobachtenden guten Qualität der Abdichtungslage spätestens zur Schlußabnahme einzureichen, um den zeitlichen Bauablauf nicht zu beeinträchtigen."

Die GDA-Empfehlung [6] konstatiert:

> "Die Versuchsergebnisse aus den Durchlässigkeitsversuchen haben dann nur Bedeutung im Hinblick auf eine Dokumentation der Ausführung."

Die beschriebene und in der Praxis übliche Vorgehensweise, über visuelle Beurteilung und verschiedene Materialkennwerte zunächst abzuschätzen, ob die Anforderung an die Dichtigkeit (s. Kap. 2) erfüllt wird, ist grundsätzlich durch den Zusammenhang zwischen Durchlässigkeitsbeiwert und Verdichtung (Wassergehalt und Trockendichte), der sich bei im Proctorversuch nach DIN 18127 hergestellten Proben ergibt, berechtigt. Damit kann festgestellt werden, inwieweit der innerhalb und außerhalb der zulässigen Einbauwassergehaltsgrenzen ermittelte k-Wert vom Grenzwert abweicht. Das Durchlässigkeitsminimum stellt sich bei geringfügig höheren Wassergehalten als dem optimalen ein (ZELLER & SCHNELLER, 1957; KNÜPFER, 1990).

Die Beziehung Dichtigkeit/Verdichtung kann sich jedoch nur im Proctorversuch aufgrund der festgelegten Verdichtungsarbeit und der definierten Aufbereitungsbedingungen deutlich herauskristallisieren. Die Ergebnisse von Durchlässigkeitsuntersuchungen im Feld entnommener Proben weisen mehr oder weniger große Streuungen auf, weil zum einen

- alle Trockendichten zwischen den maximal möglichen, durch den Sättigungsgrad $S_r = 1$ begrenzt, und den minimal zulässigen, durch den Mindestverdichtungsgrad begrenzt, erlaubt sind, sofern die zulässigen Einbauwassergehaltsgrenzen von üblicherweise $w_{Pr} \leq w \leq w_{0,95Pr}$ (s. Kap. 2) eingehalten werden, und zum anderen
- Material- und Einbauinhomogenitäten auftreten.

Beispiel (s. Bild 2):

Als mineralische Deponiebasisabdichtung wurde ein im Feld aufbereiteter, leicht plastischer Ton TL (nach DIN 18196) eingebaut. Das Bild zeigt für die Proben der im Labor hergestellten Proctorteilversuche (Proctorproben) und für die insgesamt 94 Proben aus der fertiggestellten Dichtung (Feldproben) die Ergebnisse der Trockendichten und der Durchlässigkeitsbeiwerte in Abhängigkeit vom Wassergehalt.

Die baubegleitend durchgeführten Proctorversuche (s. Diagramm Trockendichte/Wassergehalt) und die Untersuchungen zur Bodenklassifikation zeigen eine gute Gleichförmigkeit der Materialeigenschaften an.

Die Streuungen bei den Feldproben innerhalb der zulässigen Bandbreiten für die Wassergehalte ($w_{Pr} \approx 0{,}105 \leq w \leq w_{0,95Pr} \approx 0{,}135$) und die Trockendichten ($\rho_d \geq \rho_{0,95Pr} \approx 1{,}92$ t/m³) sind deutlich erkennbar. Bei ca. zwei Drittel der Feldproben liegen die Trockendichten in etwa in der Größenordnung der im Proctorversuch ermittelten Dichten. Die übrigen Proben weisen niedrigere Verdichtungen auf. Höhere Verdichtungen, besonders in unmittelbarer Nähe des Sättigungszustandes (Sättigungszahl $S_r = 1{,}0$), treten nicht auf.

Die Durchlässigkeitsuntersuchungen an Proctorproben ergeben im erlaubten Wassergehaltsbereich Durchlässigkeitsbeiwerte von etwa $k = 5 \cdot 10^{-11}$ m/s. Die Ergebnisse von rund 45 % der Feldproben liegen mit $k > 1 \cdot 10^{-10}$ m/s mindestens um den Faktor 2 über diesem Wert. Die zu diesen Proben gehörenden Trockendichten weisen überwiegend geringere als nach Proctorkurve mögliche Zahlenwerte auf. Das verdeutlicht die Relevanz der Bodenverdichtung im Hinblick auf die Zielgröße Dichtigkeit.

Ca. 9 % der Feldproben überschreiten sogar einen Grenzwert von $k = 5 \cdot 10^{-10}$ m/s. Bei Nichtberücksichtigung dieser Proben, die aus anschließend sanierten Bereichen oder Versuchsfeldern stammen, ergibt sich in der Gesamtbilanz der Proben ein mittlerer Durchlässigkeitsbeiwert von $k_m = 1{,}2 \cdot 10^{-10}$ m/s. Das bedeutet in Bezug auf den nachweislich durchaus erreichbaren Durchlässigkeitsbeiwert von etwa $k = 5 \cdot 10^{-11}$ m/s eine Zunahme bzw. Verschlechterung um den Faktor 2,4.

Die k-Werte der Proctorproben verdeutlichen auch die Relevanz der Einhaltung des Mindestwassergehaltes. Bei einem bereits um 1 % Wassergehalt zu trockenen Einbau des Bodens (w_{Pr} - 1 %) ergibt sich mit $k \approx 2 \cdot 10^{-10}$ m/s eine etwa vierfach höhere Durchlässigkeit.

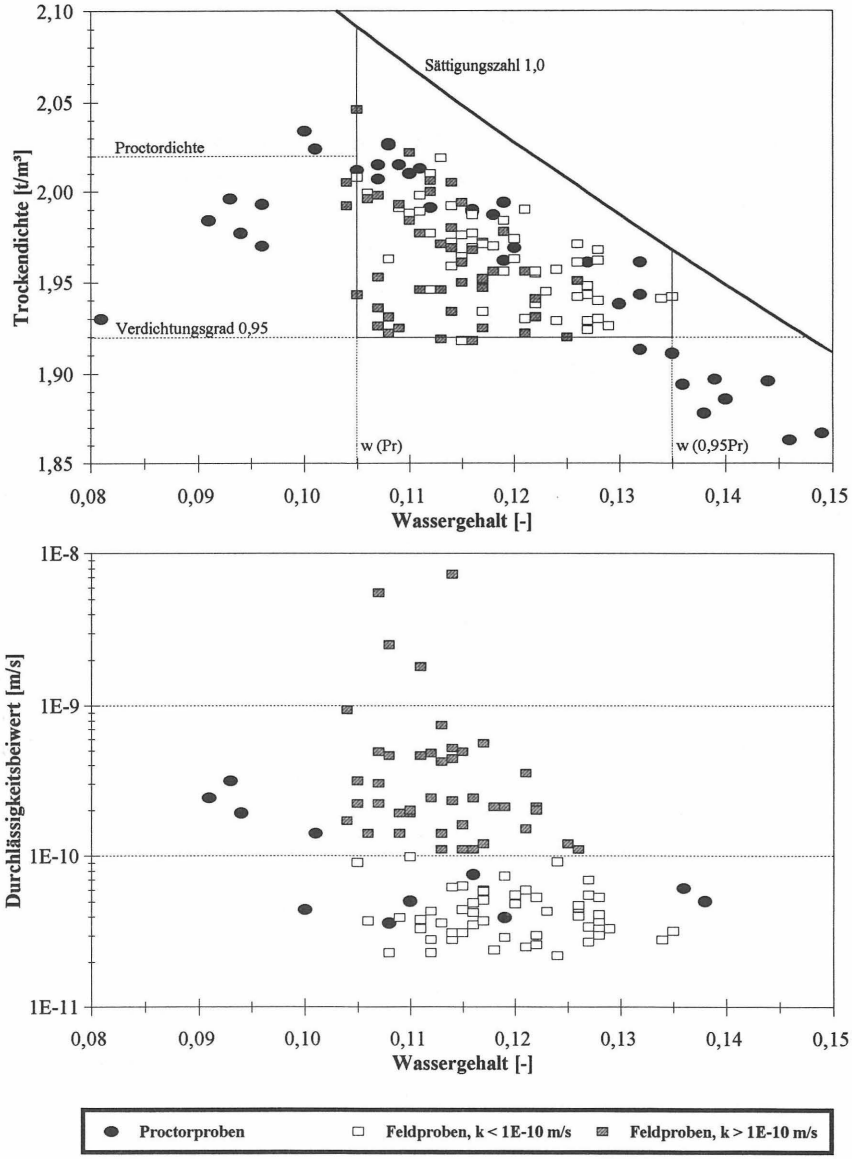


Bild 2: Zusammenhang zwischen Wassergehalt, Trockendichte und Durchlässigkeit am Beispiel eines leicht plastischen Tons TL

3.3 Bewertung von Prüfmethodiken

3.3.1 Übersicht

Für den Nachweis einer Bodenverdichtung sind aus dem Erdbau verschiedene Prüfmethodiken bekannt. Der nachfolgende Teil der Arbeit ist nach den drei wesentlichen Vorgehensweisen gegliedert (KUDLA, 1990):

- Prüfung mit subjektiver Meßstellenauswahl
- Prüfung nach statistischem Prüfplan
- Flächendeckende Prüfverfahren.

Diese Prüfmethodiken werden vorgestellt und im Hinblick auf einen Einsatz im mineralischen Dichtungsbau bewertet.

Das Herzstück der einzelnen Prüfmethodiken bilden die jeweils zugehörigen Meßverfahren. Für diese werden, soweit sie bei dichtenden Bodenmaterialien üblicherweise eingesetzt werden (Ausstechzylinderverfahren nach DIN 18125, T.2 und radiometrisches Meßverfahren (Kap. 2)) oder ihr Einsatz zur Diskussion steht (Walzenintegrierte Meßsysteme), Vor- und Nachteile als Grundlage für den anschließenden Optimierungsansatz (Kap. 3.4) erarbeitet.

3.3.2 Prüfung mit subjektiver Meßstellenauswahl

Der an einer Meßstelle beobachtete Merkmalswert wird dem Merkmalswert in der gesamten diesem Versuch zugeordneten Fläche gleichgesetzt, ohne daß Streuungen des Meßverfahrens oder des erzielten Meßwertes berücksichtigt werden. Erfüllt der Meßwert die Anforderungen nicht, wird die Fläche saniert und der Erfolg der Arbeiten durch erneute Messung nachgewiesen.

Das Kernproblem liegt jeweils in der Zuordnung Meßstelle → Bezugsfläche (exakter: Meßvolumen → Bezugsvolumen).

Diesbezüglich haben FLOSS & KUDLA (1989) 90 Dichtemessungen in einem Abstand von 1,25 m in einem zuvor sehr gut homogenisierten tonigen Schluffmaterial einer Dammkerndichtung (ρ_{Pr} = 1,83 t/m³) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 3 grafisch dargestellt. Bereits innerhalb relativ kleiner Bereiche treten starke Dichte- und folglich Verdichtungsgradschwankungen auf.

Die Zuordnung eines Meßergebnisses zu einer bestimmten größeren Fläche ist damit nicht möglich.

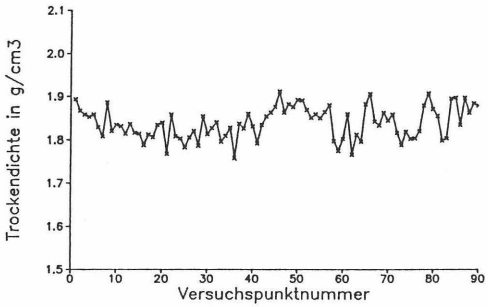


Bild 3: Dichtemessungen in tonigem Schluff, Abstand 1,25 m (FLOSS & KUDLA, 1989)

Diese Vorgehensweise der Meßstellenauswahl und der Ergebnisbewertung entspricht der im Dichtungsbau üblichen Prüfmethodik.

Als Meßverfahren kommen in einem festgelegten Prüfraster zum Einsatz (s. Tab. 1 c):

- Ausstechzylinderverfahren nach DIN 18125, T.2 und
- radiometrisches Meßverfahren.

Die Kritikpunkte an dem Standard-Meßverfahren mit dem Ausstechzylinder nach DIN 18125, T.2 können wie folgt zusammengefaßt werden:

- keine flächendeckende Prüfung und Beurteilung
  Ein geforderter Mindestprüfumfang von einer Probe auf 1.000 m² Lagenfläche entspricht bei einer Lagendicke von 25 cm einem Verhältnis Meßvolumen/Bezugsvolumen von nur 0,0000035. Die Zuordnung des Meßergebnisses zum Bezugsvolumen ist nicht möglich.

- zerstörende Prüfung
  Die an der entnommenen Probe ermittelten Kennwerte, die Dichte und der im nachhinein im Laborversuch ermittelte Durchlässigkeitsbeiwert, spiegeln nicht mehr den Ist-Zustand am Entnahmeort wider. Bei der fachgerechten Entnahme der Probe nach GDA-Empfehlungen [6] oder DIN 4021 entsteht in der fertiggestellten Dichtung ein Beprobungsloch von ca. 35 l bzw. 120 l Volumen. Zur Wiederverfüllung ist geeignetes Dichtungsmaterial unter Aufsicht der Fremdprüfung einzubauen und zu verdichten.

- großer Zeitaufwand
  Je nach Eigenschaft des Dichtungsmaterials ist für die Arbeit am Prüfort ein Zeitaufwand von 20 bis 45 Minuten zu kalkulieren. Für die anschließende Bestimmung der maßgebenden Parameter Wassergehalt und Dichte im Baustellenlabor werden bei Einsatz der Schnellprü-

fung mit der Mikrowelle zur Wassergehaltsbestimmung (KNÜPFER, 1990) zusätzlich bis zu 30 Minuten benötigt.

- Vorteil der Homogenitätskontrolle am Prüfort
  Ein wesentlicher Vorteil dieses Prüfverfahrens liegt in der Kontrollierbarkeit der Homogenität. Im Beprobungsloch können die Kriterien Stückigkeit, Wassergehaltshomogenität, Fremdmaterial, Tiefenwirkung der Verdichtung, Trennflächen etc. visuell beurteilt werden.

Das Meßverfahren nach dem radiometrischen Prinzip, das - wenn überhaupt - ergänzend zum Standard-Meßverfahren eingesetzt wird, ist unter den genannten Aspekten wie folgt einzustufen:

Das Meßverfahren gewährleistet ebenfalls keine flächendeckende Prüfung und Beurteilung der Dichtungslage. Da die Dichtemessung auf dem Prinzip der Einstichsonde ($\varnothing \approx 2$ cm) basiert, handelt es sich um eine zerstörende Prüfung. Das Meßverfahren erlaubt keine Einsicht in die Struktur der Dichtung, so daß Homogenitätskontrollen ohne Aufgraben der Prüfstelle nicht möglich sind. Nach Abschluß erforderlicher Kalibrierungsarbeiten sind im eigentlichen Prüfbetrieb 4 Messungen pro Stunde durchaus realistisch. Da die Ergebnisse unmittelbar nach einer Messung vorliegen, sind gegenüber dem Standardmeßverfahren deutlich mehr Prüfungen innerhalb eines bestimmten Zeitraumes möglich. Damit ist zumindest eine Tendenz zur flächendeckenderen Qualitätsprüfung vorhanden.

3.3.3 Prüfung nach statistischem Prüfplan

Mit von KUDLA (1990) beschriebenen statistischen Prüfplänen lassen sich bei adäquater Formulierung der Anforderungen objektive Abnahmekriterien aufstellen. Voraussetzung ist allerdings die strikte Zufallsauswahl der Versuchspunkte. Als Anforderung werden ein Grenzwert und ein maximal zulässiger Schlechtanteil (Fraktilenwert) festgelegt. Bei Nichterfüllung ist die gesamte Fläche zu sanieren.

Der entscheidende Nachteil dieser Prüfpläne besteht darin, daß nur Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung oder eine bestimmte Fraktile) der Verteilung des Merkmals beurteilt werden und die Lokalisierung mangelhaft verdichteter Teilflächen nicht möglich ist.

Diese Vorgehensweise ist auch im mineralischen Dichtungsbau grundsätzlich durchführbar. Es könnten z.B. die bekannten Meßverfahren (s. Kap. 3.3.2) eingesetzt werden.

3.3.4 Flächendeckende Prüfverfahren

Mit walzenintegrierten Meßsystemen läßt sich unmittelbar aus dem Bewegungsverhalten des Verdichtungsgerätes bei definierten Maschinenparametern auf den Verdichtungszustand des Bodens schließen. Diese arbeitsintegrierten, flächendeckenden Prüfverfahren bedeuten statistisch gesehen eine Totalprüfung. Erforderlichenfalls können einzelne Stellen gezielt nachgebessert werden (s. Bild 4). Damit wird der Bauablauf so wenig wie möglich gestört und im Haupteinsatzgebiet, dem modernen Verkehrswegebau, den hohen Zuverlässigkeitsanforderungen an ein gleichmäßiges Tragverhalten von Unterbaukonstruktionen im Gegensatz zu konventionellen Prüftechniken mit stichprobenartigen Kontrollen standgehalten.

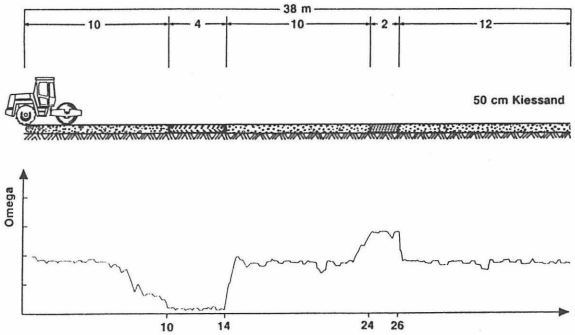


Bild 4: Meßergebnis einer Meßstrecke (BOMAG)
10 - 14 m: geringe Verdichtung
24 - 26 m: hohe Verdichtung

Die Möglichkeit einer flächendeckenden Kontrolle in Verbindung mit einem wirtschaftlichen Einsatz arbeitsintegrierter Meß- und Dokumentationsgeräte (Minimierung der Walzübergänge, genaue Lokalisierung von Fehlstellen, Bauzeit- und Prüfkosteneinsparung) ist für die Verdichtung homogener nichtbindiger Böden Gegenstand verschiedener Erfahrungsberichte aus der Praxis und wäre sicherlich auch im mineralischen Dichtungsbau eine wünschenswerte Ideallösung.

Die Anwendung des Verfahrens bei bindigen Böden verursacht bei hohen Wassergehalten einen starken Meßwerteabfall durch Porenwasserüberdrücke, so daß den Ergebnissen nur ein orientierender Charakter zugesprochen werden kann (SAMARAS & LAMM, 1990). Das Erfordernis gesonderter Untersuchungen zur Anwendbarkeit beziffert LANGER (1991) auf mehr als 15 Gew.-% Feinkornanteil. Die Verdichtungsmeßwerte müssen mit herkömmlichen Ver-

dichtungsmeßmethoden korrelierbar bleiben. Erst die "Kalibrierung" erlaubt eine Vergleichs- und Beurteilungsmöglichkeit der Meßwertaussage.

Auf der Basis umfangreicher theoretischer und experimenteller Untersuchungen diskutiert GRABE (1992) die vorhandenen Meßverfahren der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) hinsichtlich ihrer Aussagekraft und Anwendungsgrenzen. Aus dem Bewegungsverhalten einer Vibrationswalze mit glatter Bandage wird ein mechanisches Simulationsmodell entwickelt, bei dem das Verdichtungsgerät durch einen Einmassenschwinger in vertikaler Richtung idealisiert und der Untergrund durch einen plastifizierten Kontaktbereich direkt unterhalb der Walze und einen elastischen Halbraum ersetzt wird. Der Kontaktbereich, in dem die bleibenden Verformungen auftreten, koppelt die Teilsysteme 'Vibrationswalze' und 'elastischer Untergrund'. Die geometrische Dämpfung infolge Wellenabstrahlung und die elastische Rückfederung im Untergrund stehen in direktem Zusammenhang mit Schubmodul und Dichte. Die vereinfachend getroffene Annahme, daß der Kontaktkraftverlauf im Kontaktbereich für Be- und Entlastung unabhängig von dem Betrag der Belastungsgeschwindigkeit ist, ist nur zulässig, wenn der Boden im Kontaktbereich keine erhebliche Viskosität aufweist. Die Modellbildung ist somit auf körnige Böden beschränkt.

Eine Übertragbarkeit der Modellbildung auf bindige Böden ist folglich nicht ohne weiteres möglich und setzt die sehr schwierige Integration zusätzlicher Randbedingungen voraus. So werden im Dichtungsbau überwiegend Verdichtungsgeräte anderen Typs (Stampffußwalzen etc.) mit erheblich niedrigeren Fahrgeschwindigkeiten eingesetzt. Die Modellierung des Untergrundes unterhalb des Kontaktbereiches müßte zusätzlich zur elastischen Rückfederung und der geometrischen Dämpfung auch eine Materialdämpfung beinhalten. Weiterhin wäre für die praxisnahe Anwendung die Aussagekraft der Meßergebnisse in bezug auf die Nähe des Planums bzw. tieferliegender Schichten, mit möglicherweise anderer Steifigkeit, und den sukzessiven, relativ dünnlagigen Einbau des Dichtungsmaterials zu überprüfen.

Für den Einsatz in der Praxis werden die bisher gesammmelten Erfahrungen in einem 1993 erstmals erschienenen "Merkblatt über flächendeckende dynamische Verfahren zur Prüfung der Verdichtung im Erdbau" [15] vorgestellt und die Anwendungen geregelt. Während für den Einbau gemischt- und feinkörniger Böden deutlich unterhalb des optimalen Wassergehaltes eine gute Reproduzierbarkeit der Messungen und hinreichende Korrelation zwischen dem FDVK-Wert und dem Verformungsmodul erkennbar sei, gilt für die im Dichtungsbau relevanten Einbaubedingungen:

"Bei gemischtkörnigen Böden der Bodengruppen GU*, SU*, GT*, ST* mit Feinkornanteilen > 15 % wird der Einfluß des Wassergehaltes dicht unter und über dem optimalen

so groß, daß die Zuordnung von FDVK-Werten zum Verformungsmodul bzw. Verdichtungsgrad nicht mehr eindeutig ist."

Bei feinkörnigen Böden ist die Zuordnung ebenfalls nicht möglich.

3.4 Diskussion und Optimierungsansatz

Die flächendeckenden Prüfverfahren mit walzenintegrierten Meßsystemen liefern bei Einbau gemischt- und feinkörniger Böden über dem optimalen Wassergehalt keine eindeutige Zuordnung zwischen Anzeigewert und Verformungsmodul bzw. Verdichtungsgrad. Zur Verbesserung der Meß- und Auswertemethodik bis zur Einsatzreife sind umfangreiche Forschungsarbeiten erforderlich. Die Ergebnisse der in dieser Arbeit durchgeführten dynamischen Untersuchungen geben wichtige Hinweise (s. Kap. 6). Bei walzenintegrierten Mesungen ist besonders auf die Nachvollziehbarkeit bzw. Transparenz der Prüfmethode für außenstehende Prüforgane, z.B. Fremdüberwachung, zu achten.

Die Prüfmethodiken mit subjektiver Meßstellenauswahl oder statistischem Prüfplan liefern hinsichtlich einer ausreichenden Fehlstellenidentifikation als Grundlage erfolgreicher Sanierungsarbeiten keine befriedigenden Ergebnisse. Es ist sogar zu befürchten, daß durch die Sanierungsarbeiten auf der gesamten Bezugsfläche unter Umständen bestimmte Teilflächen, die mit ausreichendem Erfolg hergestellt waren, nachteilig verändert werden.

Da die Vermeidung von Fehlstellen (s. Kap. 3.1.2) höchste Priorität besitzt, müssen durch optimierte Aufbereitung und Herstellung einerseits und effektive Prüfung andererseits die maßgebenden Parameter Homogenität und Dichtigkeit (bzw. Verdichtung) entscheidend verbessert werden. Die Prüfung kann prinzipiell nur in verbesserter Form auf der bisherigen Prüfmethodik (s. Kap. 3.3.2) basieren. Das Meßverfahren muß als prüfrasterverdichtende Zusatzuntersuchung mit hoher Aussagesicherheit geeignet sein und die folgenden Eigenschaften in optimaler Kombination besitzen:

- möglichst zerstörungsfreie Prüfung,
- möglichst zeitsparende Prüfung und damit auch die Voraussetzung zu einer möglichst flächendeckenden Prüfung.

Im Kern ist die Anwendbarkeit zerstörungsfreier Meßverfahren zu prüfen.

In den Kapiteln 5 und 6 werden die Ergebnisse einer Vielzahl von Labor- und Felduntersuchungen vorgestellt und analysiert, um grundsätzliche Möglichkeiten und Anwendungsgrenzen aufzuzeigen.

4. ZERSTÖRUNGSFREIE MESSVERFAHREN

4.1 Allgemeines

Zerstörungsfreie Meßverfahren zur Qualitätskontrolle verdichteter Bodenschichten können in folgende Kategorien eingeteilt werden:

- Radiometrische Meßverfahren (Kap. 4.2)
- Statische bzw. quasistatische Meßverfahren (Kap. 4.3)
- Dynamische Meßverfahren (Kap. 4.4 und 4.5).

Zu den einzelnen Verfahren wird zunächst eine tabellarische Übersicht über die jeweils bestehenden Regelwerke und die Anwendungsbedingungen im Hinblick auf die Eigenschaften des zu prüfenden Erdkörpers (Prüfmedium) sowie die zur Prüfung notwendigen gerätetechnischen und sonstigen Voraussetzungen gegeben.

Der Einsatz radiometrischer Meßverfahren im mineralischen Dichtungsbau ist grundsätzlich anerkannt (Kap. 2). Die Kriterien für eine zerstörungsfreie Messung werden bei der Bestimmung des Wassergehaltes erfüllt (Kap. 4.2.2). Bei der Dichtebestimmung (Kap. 4.2.3) hingegen handelt es sich im Regelfall der Anwendung um eine zerstörende Prüfung, weil die Strahlenquelle durch ein herzustellendes Loch in das zu prüfende Bodenmaterial eingebracht wird. Die Anwendungsmöglichkeit als wirklich zerstörungsfreie Prüfung, dabei werden nur Messungen im oberflächennahen Bereich durchgeführt, wird vorgestellt und später anhand eines Beispiels aus der Praxis bewertet (Kap. 5).

Die Möglichkeiten einer praxisgerechten Anwendbarkeit der statischen und dynamischen Verfahren im mineralischen Dichtungsbau werden im Sinne des Optimierungsansatzes (Kap. 3.4) diskutiert. Dabei kann nur die Verformbarkeit und nicht der Wassergehalt bestimmt werden.

Die dynamischen Meßverfahren gewinnen in jüngster Zeit durch die Möglichkeiten moderner Elektronik und der damit verbundenen Entwicklung optimierter Meßtechnik und theoretischer Berechnungsverfahren zunehmend an Bedeutung. Die praktische Anwendung im mineralischen Dichtungsbau ist jedoch, ähnlich wie bei der beschriebenen Entwicklung flächendeckender Qualitätskontrollen mittels walzenintegrierter Meßsysteme (Kap. 3), aufgrund der speziellen Boden- und Einbauverhältnisse problematisch.

Für den dynamischen Plattendruckversuch mit Hilfe des Leichten Fallgewichtsgerätes (Kap. 4.5) sind das Meßverfahren und der Stand bisheriger Erfahrungen detaillierter erläutert, da auf Basis dieses Versuches ein Teil der eigenen Untersuchungen durchgeführt wurde (Kap. 6).

4.2 Radiometrische Meßverfahren

4.2.1 Übersicht

Bei den radiometrischen Meßverfahren werden die Strahlungen radioaktiver Isotope mit Hilfe von Sonden und Zählgeräten gemessen und die Meßwerte in Beziehung zum Wassergehalt und zur Dichte des durchstrahlten Mediums gesetzt.

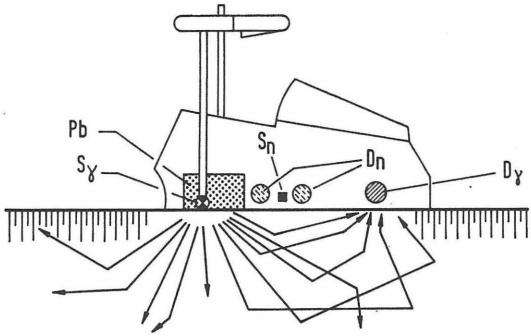
Die Charakteristika radiometrischer Meßverfahren sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

	Radiometrische Meßverfahren
Regelwerke	Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau TP BF-StB, Teil B 4.3 Anwendung radiometrischer Verfahren zur Bestimmung der Dichte und des Wassergehaltes von Böden Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe "Erd- und Grundbau", Ausgabe 1988
Zweck	Bestimmung des Wassergehaltes und der Dichte von Böden, Anwendung im Straßenbau
Prüfmedium	ebene Prüffläche, ungebundene und gebundene Stoffe
Voraussetzung	Umgangsgenehmigung nach der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV), Transportgenehmigung zur Beförderung auf öffentlichen Straßen nach der Gefahrgutverordnung Straße (GGVS)
Meßgröße	Strahlungen radioaktiver Isotope (⇒ Wassergehalt und Dichte)

Tabelle 5: Radiometrische Meßverfahren

Bild 5 zeigt eine kombinierte Aufsetz- und Einstichsonde mit Gammastrahler zur Dichte- und Neutronenstrahler zur Wassergehaltsbestimmung. In der dargestellten Aufsetzposition bleiben Gammaquelle und -detektor an der Bodenoberfläche und somit kann die Dichte zerstörungsfrei über das Prinzip der Rückstreumethode ermittelt werden. Für (zerstörende) Messungen nach dem Durchstrahlungsprinzip wird der Gammastrahler in Tiefen von 5 - 30 cm, in 5 cm - Stufen regelbar, positioniert.

Einzelheiten zu physikalischen Grundlagen, Gerätekonstruktionen und Kalibrierungen, Versuchsanordnungen und -durchführungen, Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Meßwerte, Vergleichsuntersuchungen mit anderen Meßverfahren und Anwendungsgrenzen sind Bestandteil einer umfangreichen Literatur ([11]; KNÜPFER, 1990; WEILAND, 1988; TROXLER, 1991 u. 1985 u.a.) und werden hier nur dem Erfordernis der Arbeit entsprechend beschrieben.



Quelle:

S_γ Gamma-Strahlen

S_n Neutronen-Strahlen

Detektor:

D_γ Gamma-Strahlen

D_n Neutronen-Strahlen

Pb Bleiabschirmung

Bild 5: Kombinierte Aufsetz- und Einstichsonde mit Gamma- und Neutronenstrahler (KNÜPFER, 1990)

4.2.2 Bestimmung des Wassergehaltes

Meßprinzip:

Vom Neutronenstrahler werden schnelle, energiereiche Neutronen in das zu prüfende Medium ausgesendet. Beim Aufprall auf Atomkerne geben sie nach dem Prinzip des elastischen Stoßes zweier Kugeln um so mehr Energie an den angestoßenen Kern ab, je geringer der Massenunterschied zwischen Kern und Neutron ist. Nur Wasserstoff besitzt eine dem Neutron entsprechende Masse, die Masse aller anderen Atomarten ist wesentlich höher. Die Neutronen werden von Wasserstoffatomen abgebremst (Neutronen-Moderation) bis die Geschwindigkeit durch weitere Kollisionen nicht mehr reduziert wird. Nach 19 Kollisionen mit einem Wasserstoffatom wird in einem Helium-3-Zählrohr (Detektor) eine nachweisbare Ionisation ausgelöst. Je mehr langsame Neutronen gezählt werden, um so höher ist der Wassergehalt des durchstrahlten Materials.

Tiefenwirkung:

Bei niedrigem Wassergehalt des Bodens und daher wenigen Kollisionsgelegenheiten zwischen Neutronen und Wasserstoffatomen werden größere Reichweiten als bei hohem Wassergehalt erzielt. Die Messung des Wassergehaltes umfaßt ein annähernd halbkugelförmiges Bodenvolumen. Der Radius beträgt bei sehr feuchtem Boden etwa 15 cm, bei trockenem Boden etwa 30 - 40 cm [11].

Nach Herstellerangaben (TROXLER, 1985) gilt für den Zusammenhang zwischen Meßtiefe und Wassergehalt (hier: Feuchtegehalt M in [kg/m³]) folgende Faustformel:

$$\text{Meßtiefe [mm]} = 280 \text{ mm} - 0{,}27 \cdot M \text{ [kg/m}^3\text{]}.$$

Damit ergeben sich für typische mineralische Dichtungsmaterialien Meßtiefen von etwa 15 cm bis 25 cm (Beispiele in Tabelle 6). Die Gleichung umfaßt 90 % des Meßvolumens und ist für alle im mineralischen Dichtungsbau relevanten Wassergehalte gültig. Der Zusammenhang zwischen Meßtiefe und Wassergehalt ist in Bild 6 grafisch dargestellt.

Bodengruppe (DIN 18 196)	ρ_{Pr} [t/m³]	w_{Pr} [-]	M [kg/m³]	Tiefe [cm]
TA	1,3	0,34	442	16
TA	1,5	0,26	390	18
TL	1,8	0,15	270	21
TL	2,0	0,11	220	22

Tabelle 6: Beispiele für Meßtiefen bei mineralischen Dichtungsmaterialien

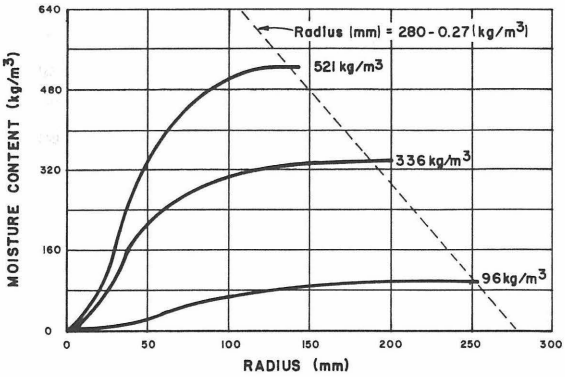


Bild 6: Zusammenhang Wassergehalt (hier: Feuchtegehalt [kg/m³]) und Meßradius, Kurvenverläufe für drei Beispiele (TROXLER, 1985)

4.2.3 Bestimmung der Dichte

Meßprinzip:

Von der Strahlenquelle wird die Gamma-Strahlung eines radioaktiven Isotops ausgesendet. Beim Rückstreuprinzip wird die gesamte, meßtechnisch bedeutsame Strahlung durch die Bleiabschirmung in den Boden gerichtet. Beim Durchstrahlungsverfahren wird der Gamma-Strahler bis in eine bestimmte Tiefenposition in die Materie eingeführt, von wo die Photonen vorwiegend auf direktem Weg die Zählrohre erreichen können. Dabei kommt es durch Streuprozesse und Absorption zur einer Energieabschwächung, die von der Dichte der Elektronen in der Materie und der Weglänge abhängig ist. Am Detektor wird die ankommende Gamma-Strahlung mit Geiger-Müller-Zählrohren, in denen die Photonen durch Ionisation des darin enthaltenen Gases meßbare elektrische Impulse auslösen, nachgewiesen. Je größer die Energieabschwächung ist, um so höher ist die Dichte des durchstrahlten Materials.

Tiefenwirkung:

Beim Einsatz des Meßgerätes als Aufsetzsonde (zerstörungsfrei) müssen die Photonen auf dem Weg zum Detektor mindestens einmal umgelenkt werden (Rückstreumessung). Der Meßwert wird überwiegend von den Materialeigenschaften im oberflächennahen Bereich beeinflußt. Bild 7 zeigt den prozentualen Einfluß der Schichtdicke auf den Gesamtmeßwert bei der Rückstreumessung. Dieser ist für die im Grund- und Straßenbau relevanten Materialien dichteunabhängig. Der Haupteinfluß stammt aus den oberen 3 cm. Die Photonen, die in einer Distanz von mehr als etwa 10 cm gestreut werden, können kaum noch vom Zählrohr erfaßt werden.

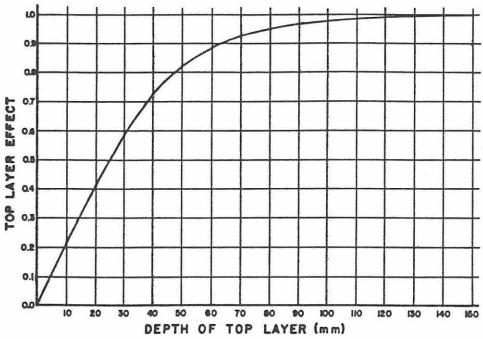


Bild 7: Tiefenwirkung der Dichtemessung beim Rückstreuverfahren (TROXLER, 1985)

Beim Einsatz des Gerätes als Einstichsonde (zerstörend) ergibt sich der Meßwert als Mittelwert der Dichte des Prüfmediums zwischen der Lage der Strahlenquelle (Einstichtiefe) und der Oberfläche.

Aufsetzsonden reagieren wegen ihrer geringen Tiefenwirkung und des verhältnismäßig kleinen Meßvolumens empfindlich auf Unebenheiten an der Oberfläche und auf Inhomogenitäten in der Nähe der Oberfläche. Meßergebnisse auf grobkörnigen Böden mit an der Oberfläche offenen Hohlräumen sind nicht repräsentativ für die tatsächliche Dichte. Die Meßgenauigkeit beim Rückstreuverfahren kann gegenüber dem Durchstrahlungsverfahren auch infolge des größeren Einflusses der chemischen Zusammensetzung des Prüfmediums etwas geringer sein.

4.3 Statische Meßverfahren

4.3.1 Übersicht

Die Charakteristika zerstörungsfreier statischer bzw. quasistatischer Prüfverfahren sind in Tabelle 7 gegenübergestellt.

Das bekannteste statische Meßverfahren ist der Plattendruckversuch, für den als einziges zerstörungsfreies Meßverfahren eine DIN-Norm vorliegt (DIN 18134).

Die Idealisierung des eindeutig spannungsabhängigen Verformungsverhaltens ungebundener Straßenbaumaterialien als linearelastisches Verhalten sowie die Vernachlässigung des bleibenden Verformungsanteils, der nach Untersuchungen von WELLNER (1988) bis zu 20 % der Gesamtverformung nach der Viertbelastung betragen kann, war Ausgangspunkt für die Entwicklung einer verbesserten Versuchsdurchführung und -auswertung an der TU Dresden.

Bei diesem sogenannten Wechsellastverfahren wird nach jeder Lasteintragung unterschiedlicher Größe in den zu prüfenden Untergrund vollständig entlastet, um plastische und elastische Verformungen in Abhängigkeit von den wirkenden Belastungen getrennt voneinander erfassen zu können. Nach DASTICH (1992) kann die Spannungs-Verformungskennlinie für praktische Bedürfnisse aus den elastischen Verformungen bei sechs unterschiedlichen Belastungen ausreichend genau bestimmt werden.

Einsenkungsmessungen mit Benkelman-Balken quantifizieren die elastische Rückverformung eines Meßpunktes als Differenz von Be- und Entlastungsmessung infolge einer Fahrzeuglast. Dieses Meßverfahren hat sich im Straßenbau zur Abschätzung der Restsubstanz vorhandener Asphaltbefestigungen als Grundlage für Entscheidungen über geeignete Erhaltungsmaßnahmen, bei der Überprüfung der Beweglichkeit von Betonfahrbahnplatten im Fugenbereich und beim quantitativen Vergleich des Tragverhaltens verschiedener Bauweisen bewährt.

	Plattendruckversuch	Plattendruckversuch nach dem Wechsellastverfahren	Benkelman-Balken	Befahrungsversuch
Regelwerke	DIN 18 134 (Januar 1993)	-	Merkblatt über Einsenkungsmessungen mit dem Benkelman-Balken Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe "Fahrzeug und Fahrbahn", Ausgabe 1991 Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau TP BF-StB, Teil B 9.3 Prüfung der Gleichmäßigkeit der Verformbarkeit von Böden mit dem Befahrungsversuch und dem Benkelman-Balken Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe "Erd- und Grundbau", Ausgabe 1988 Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau TP BF-StB, Teil B 9.1 Einsatz des Benkelman-Balkens für die Erdbaukontrolle BAST-Empfehlungen BAST-E7, Fassung Juli 1984	Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau TP BF-StB, Teil B 9.3 Prüfung der Gleichmäßigkeit der Verformbarkeit von Böden mit dem Befahrungsversuch und dem Benkelman-Balken Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe "Erd- und Grundbau", Ausgabe 1988
Zweck	Verformbarkeit und Tragfähigkeit des Bodens aus Drucksetzungslinien	Verbesserung des Plattendruckversuches	Schnellprüfverfahren zur Kontrolle der Gleichmäßigkeit des Verdichtungs- und Verformungszustandes, Reduzierung der Anzahl von Plattendruckversuchen, gezielte Auswahl von Ansatzpunkten	Schnellprüfverfahren der Verformbarkeit, Reduzierung der Anzahl von Plattendruckversuchen, gezielte Auswahl von Ansatzpunkten
Prüfmedium	ebene Prüffläche grob-, gemischt- und feinkörnige ($I_C \geq 0{,}75$) Böden	ebene Prüffläche grob-, gemischt- und feinkörnige ($I_C \geq 0{,}75$) Böden	gut befahrbares Erdplanum grob-, gemischt- und feinkörnige ($I_C \geq 0{,}75$) Böden mit Verformungsmoduln zwischen 20 MN/m² und 100 MN/m²	gut befahrbares Erdplanum grob-, gemischt- und feinkörnige ($I_C \geq 0{,}75$) Böden mit Verformungsmoduln zwischen 20 MN/m² und 100 MN/m²
Voraussetzung	Belastungswiderlager, z.B. LKW	Belastungswiderlager, z.B. LKW	LKW mit ca. 14 t zul. Gesamtgewicht	LKW mit 5 t Radlast, Zwillingsbereifung
Meßgröße	Kraft, Setzung (⇒Verformungsmodul E_v bzw. Bettungsmodul k_S)	Kraft, Setzung (⇒ E-Modul)	elastische Rückverformung (⇒ Abschätzung Verformungsmodul E_{v2})	bleibende Einsenkung (⇒ Abschätzung Verformungsmodul E_{v2})

Tabelle 7: Zerstörungsfreie statische bzw. quasistatische Prüfverfahren für Erdbaukontrollen

Bei Erdarbeiten läßt sich mit dem Benkelman-Balken die Gleichmäßigkeit des Verdichtungs- und Verformungszustandes gut befahrbarer Erdplanien und Tragschichten zügiger und systematischer als bei Anwendung üblicher Meßverfahren (Dichtemessungen, Plattendruckversuche) kontrollieren. Als alternatives Schnellprüfverfahren kommt der Befahrungsversuch, bei dem die bleibende Einsenkung nach LKW-Überfahrt einnivelliert wird, in Betracht. Bei beiden Meßmethoden ist vor Beginn der Kontrollarbeiten der dem erforderlichen Verformungsmodul E_{v2} bzw. dem vorgeschriebenen Verdichtungsgrad zugeordnete zulässige Einsenkungswert direkt auf der Baustelle zu ermitteln.

4.3.2 Anwendbarkeit im Dichtungsbau

Zur Beurteilung der Anwendbarkeit statischer Meßverfahren im Dichtungsbau sind primär die Einbaubedingungen vor Ort von Bedeutung. Unter Berücksichtigung des üblichen Maschineneinsatzes für die Verdichtung, walkende und stampfende Geräte (Kap. 2), und des Bauablaufs bei der sukzessiven Herstellung einzelner, übereinander herzustellender Dichtungslagen, treten im Regelfall keine ebenen Lagenoberflächen innerhalb eines Dichtungspaketes auf. Dieses ist mit Hinweis auf eine gute Verzahnung (Verbund) der Lagen auch nicht erwünscht.

Während zur fachgerechten Durchführung des Plattendruckversuches bzw. der Modifikation nach dem Wechsellastverfahren nur die Bodenoberfläche für das satte, hohlraumfreie Aufliegen der Lastplatte möglichst eben herzustellen ist, wird die Grundvoraussetzung für einen Einsatz der Schnellprüfverfahren mit dem Benkelman-Balken und dem Befahrungsversuch - das zu prüfende Erdplanum muß insgesamt gut befahrbar sein - nicht erfüllt. Der Fall des zwischenzeitlichen Herstellens einer glatten Oberfläche, z.B. aus Witterungsschutzgründen am Ende einer Tagesleistung, ist in diesem Zusammenhang ohne Bedeutung. Sofern auf dem Planum der mineralischen Dichtung die Verlegung einer Kunststoffdichtungsbahn vorgesehen ist, darf die zum einwandfreien Verbund notwendige Ebenheit der Oberfläche keinesfalls durch Verformungen aus Einsenkungsmessungen oder Befahrungen mit LKW's als Belastungswiderlager beeinträchtigt werden.

Zu einer Disqualifizierung der Prüfverfahren tragen ferner der enorme Geräte- und Personalaufwand, neben dem Belastungsfahrzeug incl. Fahrer werden ein bis zwei Personen (Versuchsleiter mit Hilfskraft) benötigt, sowie der für einen reibungslosen Bauablauf im Dichtungsbau zu hohe Zeitanspruch bei.

4.4 Dynamische Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer und dem Eigenschwingverfahren

4.4.1 Übersicht

Die Charakteristika der dynamischen Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer und dem Eigenschwingverfahren sind in Tabelle 8 gegenübergestellt.

Das Meßprinzip des Falling Weight Deflectometers (FWD) ist in Bild 8 dargestellt. Das durch den Aufschlag eines Fallgewichtes entstehende Impulssignal wird im Zentrum der Lastplatte und an weiteren sechs Meßstellen bis insgesamt etwa 1 m Abstand vom Aufschlagpunkt mit Geophonen gemessen und über ein Computerprogramm in Verformungsmodule umgerechnet.

Von Eignungs- und Vergleichsuntersuchungen sowie Prüfeinsätzen zum Qualitätsnachweis verschiedener Meßtechniken und Auswerteverfahren der Falling Weight Deflectometer liegen Berichte aus vielen Ländern, u.a. Australien (SMITH, 1985), Dänemark (KRISTIANSEN et al., 1990), Großbritannien (FERNE, 1990), Italien (MARCHIONNA et al., 1985), Norwegen (HORVLI & FAKSDAL, 1990) und USA (LARSEN, 1990; NAZARIAN & BRIGGS, (1990); ALI & KHOSLA, 1987) vor. Hauptanwendungsgebiet ist der Straßenbau.

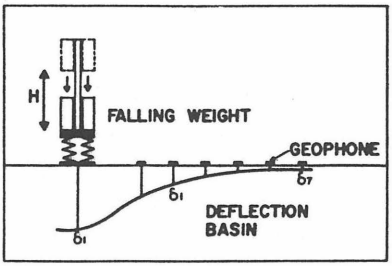


Bild 8: Meßprinzip des Falling Weight Deflectometers (MARCHIONNA et al., 1985)

Beim Eigenschwingverfahren wird eine auf den zu prüfenden Untergrund aufgelegte definierte Bezugsmasse aus Stahlplatten durch einen kurzen Nadelimpuls angeregt und die Frequenz der Eigenschwingungen gemessen (Bild 9). Bei Annahme eines schwingenden Massepunktsystems unter Halbraumbedingungen resultiert nach EHRLER (1989) die Größe der Eigenfrequenz f_e aus der Belastungsmasse m, der Kontaktfläche der Grundplatte mit dem Untergrund (über Radius r_0) und den elastischen Eigenschaften des Untergrundes, ausgedrückt durch den E-modul E und die Poissonzahl μ:

$$E = 2 \cdot \pi \cdot (1-\mu^2) \cdot m/r_0 \cdot f_e^2.$$

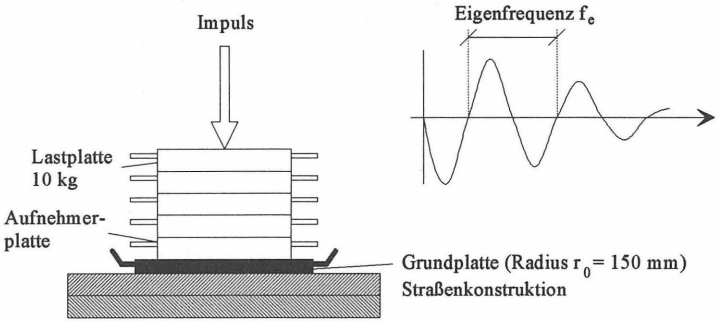


Bild 9: Meßprinzip des Eigenschwingverfahrens (nach EHRLER, 1989)

	Falling Weight Deflectometer	**Eigenschwingverfahren**
Regelwerke	-	-
Zweck	Bestimmung der Tragfähigkeit	Bestimmung der Tragfähigkeit und des Schichtmoduls gebundener Decken
Prüfmedium	ebene Prüffläche vornehmlich gebundene Baustoffe (Asphalt, Beton), auch ungebundene Tragschichten	ebene Prüffläche steife Deckenkonstruktionen bis zu weichem bindigen Untergrund
Voraussetzung	PKW mit Prüfeinrichtung auf Anhänger	zweirädriges Rollgestell
Meßgröße	Kraft, Einsenkung (⇒ Verformungsmodul)	Eigenfrequenz der Belastungsmasse (⇒ E-modul)

Tabelle 8: Zerstörungsfreie dynamische Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer und dem Eigenschwingverfahren

4.4.2 Anwendbarkeit im Dichtungsbau

Einer möglichen Anwendung des Falling Weight Deflectometer-Verfahrens im Dichtungsbau stehen zunächst folgende bereits bei den statischen Meßverfahren genannte Kriterien entgegen:

- Oberflächenunebenheit zwischen den Lagen, zulässige Verformung des Dichtungsplanums, Geräte- und Zeitaufwand

Hinzu kommt:

- Das FWD-Verfahren wird i.d.R. im Straßenbau zur Prüfung bindemittelhaltiger Materialien eingesetzt. Für ungebundene, grobkörnige Stoffe liegen zwar einzelne Untersuchungshinweise vor, nicht jedoch für gemischt- und feinkörnige Stoffe.
- Es gibt eine Vielzahl vorhandener Versuchsgeräte und Auswerteverfahren, jedoch keine einheitliche Prüfvorschrift.

Die Grundvoraussetzungen für einen Einsatz des Eigenschwingverfahrens hingegen sind positiv zu bewerten. Der Versuch kann den Einbaubedingungen vor Ort angepaßt werden. Lediglich die Gesamtmasse der Meßeinrichtung von bis zu 80 kg erfordert entsprechende Transporthilfen. Problematisch ist - wie im übrigen auch bei anderen Versuchen mit statischer oder dynamischer Lasteintragung - der Einfluß von Wassergehalt bzw. Konsistenz auf den Meßvorgang bzw. die Interpretation der Ergebnisse. Dieses ist für die Beurteilung der Anwendbarkeit im Dichtungsbau, Einbauwassergehalt i.d.R. $w_{Pr} \leq w \leq w_{0,95Pr}$ auf der nassen Seite der Proctorkurve (Kap. 2), von grundlegender Bedeutung. Im Rahmen der in dieser Arbeit u.a. durchgeführten Untersuchungen erhielt der von der Handhabbarkeit einfachere dynamische Plattendruckversuch mit Hilfe des Leichten Fallgewichtsgerätes (Kap. 4.5) nicht zuletzt deswegen den Vorzug, weil hier insgesamt ein größerer Erfahrungsschatz und insbesondere eine vereinheitlichende Prüfvorschrift [12] vorliegt.

4.5 Dynamischer Plattendruckversuch mit Hilfe des Leichten Fallgewichtsgerätes

4.5.1 Übersicht

Zur schnellen Qualitätsbewertung eingebauter Erdschichten sind dynamische Prüfverfahren in verschiedenen Ländern entwickelt und vornehmlich im Gleis- und Straßenbau eingesetzt worden. Nachdem umfangreiche Forschungsarbeiten bereits 1980 in der ehemaligen DDR zur Herausgabe einer Technischen Prüfvorschrift für die Bestimmung des dynamischen Verformungsmoduls mit dem Leichten Fallgerät (TGL 11461/10 [9]) führten, ist seit 1992 im Interesse einer Vereinheitlichung unter Einbeziehung vielseitiger Geräteentwicklungen und Erfahrungen der zukünftige Standard in der TP BF-StB, Teil B 8.3 [12] festgelegt.

Die Charakteristika des dynamischen Plattendruckversuchs sind in Tabelle 9 zusammengestellt.

	Dynamischer Plattendruckversuch
Regelwerke	Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau TP BF-StB, Teil B 8.3 Dynamischer Plattendruckversuch mit Hilfe des Leichten Fallgewichtsgerätes Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe "Erd- und Grundbau", Ausgabe 1992
Zweck	Nachprüfung der Tragfähigkeit und Verdichtung von Böden, ungebundenen Tragschichten und Bodenverbesserungen Schnellprüfung zur Steuerung von Verdichtungsarbeiten
Prüfmedium	ebene Prüffläche; grob-, gemischt- und feinkörnige ($I_C \geq 0{,}75$) Böden
Voraussetzung	keine besonderen
Meßgröße	maximale Einsenkung ($\Rightarrow$ dynamischer Verformungsmodul E_{vd})

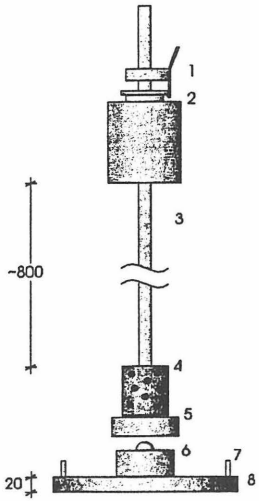
Tabelle 9: Dynamischer Plattendruckversuch mit Hilfe des Leichten Fallgewichtsgerätes

In den nachfolgenden Kapiteln werden die geräte- und versuchstechnischen Randbedingungen, sofern sie für die Erstellung dieser Arbeit notwendig sind, und die praktische Anwendbarkeit erläutert. Weitere Angaben, insbesondere zur Entwicklung der Geräte- und Meßtechnik, den theoretischen Untersuchungen des Zweimassenschwingers, dem Einfluß des Lastplattenauflagers, der Tiefenwirkung und anderen spezifischen Problemen sind der Literatur zu entnehmen (z.B. BEHR, 1986; BOHN, 1968; FLOSS & KUDLA, 1990; JORDAN, 1974; WEINGART, 1991; WINKELVOSS, 1985).

4.5.2 Prüfgeräte

Das in den Labor- und Feldversuchen eingesetzte Gerät (Kap. 6) setzt sich aus den folgenden Hauptbauelementen zusammen (s. Bild 10):

- kreisförmige starre Lastplatte
- Setzungsmeßeinrichtung in der Mitte der Lastplatte senkrecht zur belasteten Oberfläche
- Belastungsvorrichtung bestehend aus Fallgewicht, Federelement und Führungsstange mit Ausklinkvorrichtung.



1 Ausklinkvorrichtung

2 Fallgewicht (mind. St 52.0, m = 10 kg ± 0,1 kg)

3 Führungsstange (polierter Edelstahl, m = 5 kg ± 0,25 kg incl. Bauteile 1, 4 + 5)

4 Federelement (hier: Gummielement)

5 Anschlag

6 Geophon im Stahlgehäuse (Meßgenauigkeit für die Setzungsamplitude: im Bereich 0,2 mm - 1 mm: mind. ± 0,02 mm im Bereich 1 mm - 2 mm: mind. ± 2 %)

7 Tragegriffe

8 Lastplatte (mind. St 52.0, d = 300 mm, h = 20 mm, mittl. Rauhheit der Unterseite: max. 6,3 µm, m = 15 kg ± 0,25 kg incl. Bauteile 6 + 7)

Bild 10: Prinzipskizze des Leichten Fallgewichtgerätes

Alternativ werden Geräte mit Tellerfedern als Federelement eingesetzt (s.a. [9]; WEINGART, 1991). Fallgeräte mit Spiralfedern sind aufgrund der Forderung nach der Erzeugung eines möglichst halbsinusförmigen Stoßkraft-Zeitverlaufes nicht geeignet, weil Kraft- und Einsenkungsverläufe mit Oberschwingungen überlagert werden. Beim Einsatz von Gummifedern treten nach FLOSS & KUDLA (1990) die geringsten Oberschwingungen im Kraftverlauf auf. Es ist darauf zu achten, daß die Gummieigenschaften temperatur- und alterungsunabhängig sind.

4.5.3 Versuchsausführung

Die Lastplatte muß satt ohne verbleibende Hohlräume auf der Oberfläche des zu prüfenden Bodens aufliegen (evtl. Ausgleichsmaterial einsetzen). Durch Austrocknung oder Aufweichung gestörte oberflächennahe Zonen sind vor Versuchsbeginn zu entfernen. Die Belastungsvorrichtung wird mittig auf die Lastplatte positioniert und die Meßstelle durch drei Stöße vorbelastet, indem das Fallgewicht aus der durch die Kalibrierung festgelegten Höhe frei fallen gelassen und nach jedem Stoß aufgefangen wird. Nachdem so ein enger Kontakt Lastplatte/Boden hergestellt ist, folgen die eigentlichen drei Meßstöße.

Das auf der Lastplatte befestigte Geophon registriert schwinggeschwindigkeitsproportionale Signale. Durch Integration des Verlaufes der Schwinggeschwindigkeit in einem angeschlossenen Integrationsgerät wird die maximale Einsenkung der Lastplatte pro Meßstoß berechnet. Der dynamische Verformungsmodul ergibt sich bei Berücksichtigung der vorgeschriebenen Normalspannungsamplitude unter der Lastplatte von $\sigma = 0{,}1$ MN/m², des Radius der Lastplatte von r = 150 mm und des Mittelwertes s [mm] der gemessenen Setzungsamplituden zu:

$$E_{vd} = 1{,}5 \cdot r \cdot \sigma / s = 22{,}5 / s \quad [\mathrm{MN/m^2}].$$

Die Einsenkungen der Lastplatte und der daraus berechnete dynamische Verformungsmodul sind ein Maß für die Verformbarkeit des Bodens unter der definierten vertikalen Stoßbelastung.

4.5.4 Lasteinwirkung in den Untergrund

Durch die Anwendung des dynamischen Plattendruckversuches beim Bau von Verkehrswegen orientieren sich die maximale Stoßkraft F_S und die Stoßdauer t_S an den dort auftretenden wirklichen Beanspruchungen. Daher ist das Fallmasse-Federsystem so gewählt, daß die Maximalspannung unter der Lastplatte mit $\sigma = 0{,}1$ MN/m² etwa in der Mitte der Spannweite der zu erwartenden Spannungen liegt und die Stoßdauer $t_S = 18$ ms $\pm$ 2 ms der angesetzten mittleren Einwirkzeit eines rollenden Rades entspricht. Die Belastungsformen sind allerdings grundsätzlich nicht identisch, beim Fallgerät liegt eine Impulsbelastung und beim Straßenverkehr eine Schwellbelastung vor.

Die Druckspannungsverteilung unter der Lastplatte, die nach Berechnungen und Experimenten von FLOSS & KUDLA (1990) als starr angenommen werden kann, steigt nach BOROWICKA (aus WEINGART, 1981) bei einem elastisch isotropen Halbraum auf unendliche Werte am Rand (s. Bild 11):

Halbraumtheorie:

$$\sigma(x) = \frac{\sigma_0}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{x}{r}\right)^2}}$$

σ (x) Druckspannung im Abstand x zum Plattenmittelpunkt
σ_0 gleichmäßige Spannung unter der Platte
x Abstand zum Plattenmittelpunkt
r Radius der Lastplatte.

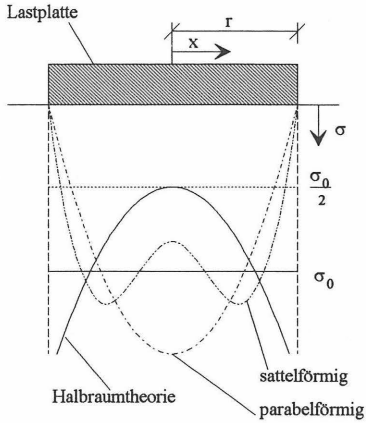


Bild 11: Druckspannungsverteilungen

Durch örtliche Plastifizierungen im Untergrund werden die singulären Sohldruckspitzen an den Plattenrändern abgebaut. Die von der Steifigkeit des Untergrundes abhängige wirkliche Spannungsverteilung wird nach BLESSING (aus WEINGART, 1981) bei nichtbindigen Böden und geringer Verdichtung parabelförmig und bei bindigen Böden und guter Verdichtung sattelförmig mit jeweils Spannungsnullpunkten am Rand verlaufen. Daher ist die Annahme einer konstanten Spannungsverteilung unter der Lastplatte näherungsweise zulässig. Da nach Untersuchungen von FLOSS & KUDLA (1990) die maximale Kraft weitgehend unabhängig von der Bodensteifigkeit ist, kann auf die Messung der Kraft verzichtet und somit die Meßtechnik erheblich vereinfacht werden.

Bezüglich der Tiefenwirkung kann als Anhaltswert festgestellt werden, daß der Hauptanteil der gemessenen Setzungen aus Tiefen von etwa 25 cm (FLOSS & KUDLA, 1990) bis zu 30 cm [12] stammt.

4.5.5 Kalibrierung

Die Kalibrierung der Belastungsvorrichtung und der Setzungsmeßeinrichtung wird beispielhaft an Hand des in den Versuchen (Kap. 6) eingesetzten Gerätes erläutert (s.a. [12]).

4.5.5.1 Belastungsvorrichtung

Die geforderte maximale Stoßkraft von F_S = 7,07 kN wird durch die Einstellung der Fallhöhe einjustiert. Dabei wird die Belastungsvorrichtung des Prüfgerätes auf eine Kraftmeßdose (Nennlast 20 kN bis 50 kN) anstelle der Lastplatte positioniert. Als nicht schwingende, starre Unterlage ist z.B. ein Betonfundament mit einer Gesamtmasse von über 200 kg geeignet.

Die bei mindestens zehnmaligem Fallenlassen des Fallgewichtes über einen Meßverstärker gemessenen maximalen Kräfte dürfen im Mittel um nicht mehr als ± 1 % von der geforderten Kraft abweichen, Einzelwerte um nicht mehr als ± 2 % vom gemessenen Mittelwert.

Bild 12 zeigt die Ergebnisse von 12 Teilversuchen. Der Mittelwert beträgt $F_{S,m}$ = 7,099 kN und liegt damit um zulässige 0,4 % über dem Sollwert von F_S = 7,07 kN. Die größte Abweichung eines Einzelwertes ($F_{S,min}$ = 7,046 kN) zum Mittelwert beträgt nur 0,7 %.

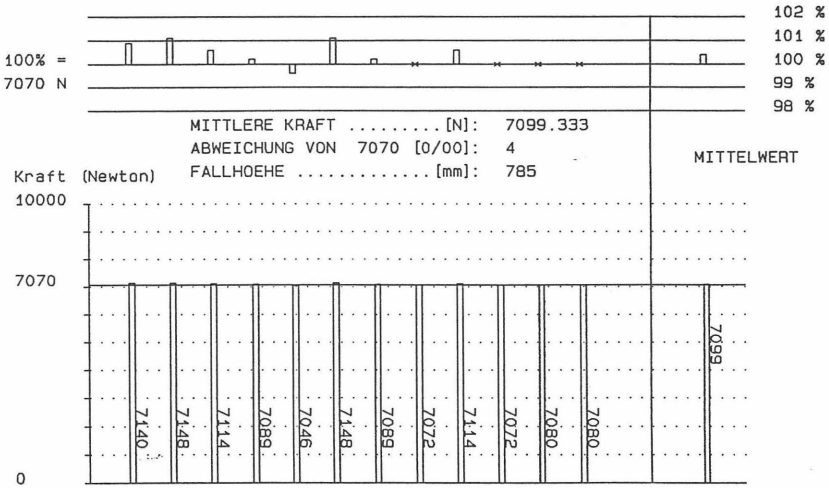


Bild 12: Kalibrierung der Belastungsvorrichtung (SIEBERTZ ELECTRONIC, 1993)

4.5.5.2 Setzungsmeßeinrichtung

Die Lastplatte des Fallgewichtsgerätes wird entsprechend der Prinzipskizze nach Bild 13 auf einer Auflagerplatte aus Stahl (Masse 30 kg ± 0,25 kg) - als Äquivalentmasse für die durchschnittlich mitschwingende Halbraummasse des Bodens - mit einer Schnellspannvorrichtung befestigt. Durch drei in der Härte und der Dicke unterschiedliche Gummiplatten wird unter der Stoßbelastung eine Setzung der Lastplatte von 0,1 mm bis 0,7 mm, 0,7 mm bis 1,3 mm und 1,3 mm bis 2 mm erzeugt.

Die mit der zu kalibrierenden elektronischen Setzungsmeßeinrichtung gemessenen Setzungsamplituden sind den Ergebnissen der induktiven Wegmessung gegenüberzustellen. Bei 10 Fallstößen darf der Unterschied der beiden gemessenen Mittelwerte nicht mehr als 0,02 mm betragen, Einzelwerte dürfen nicht mehr als 0,04 mm voneinander abweichen.

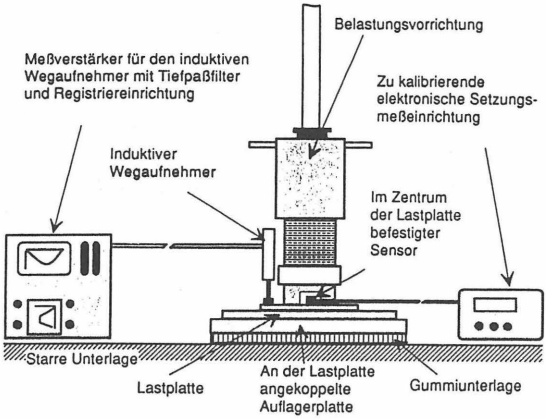


Bild 13: Prinzipskizze für die Kalibrierung der Setzungsmeßeinrichtung (aus [12])

Bild 14 zeigt die Ergebnisse von 12 Teilversuchen unter Verwendung der Gummiplatten für eine Setzung der Lastplatte im mittleren der drei Verformungsbereiche. Die Mittelwerte der Setzungsamplituden sind für beide Meßverfahren identisch $s_m = 0{,}87$ mm. Die Abweichung der jeweiligen Einzelwerte von maximal $\Delta s = 0{,}01$ mm liegt im zulässigen Bereich.

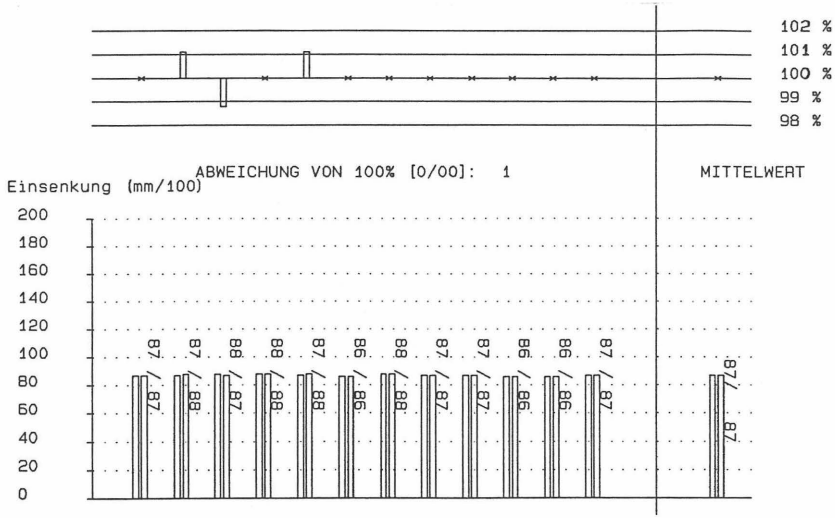


Bild 14: Kalibrierung der Setzungsmeßeinrichtung (SIEBERTZ ELECTRONIC, 1993)

4.5.6 Anwendbarkeit

4.5.6.1 Grundsätzlich

Die Vorteile, die für den Einsatz des dynamischen Plattendruckversuches zur Qualitätsprüfung eingebauter Erdschichten sprechen, sind im allgemeinen Prüfablauf und in der speziellen Gerätetechnik begründet:

Prüfablauf:
- zerstörungsfreie Prüfung
- geringer Zeitaufwand
- gute flächendeckende Kontrolle
- Bestimmung der Gleichmäßigkeit einer Prüffläche
- Steuerung von Verdichtungsarbeiten

Gerätetechnik:
- Abmessungen, geringer Platzbedarf und geringes Gewicht ermöglichen Einsatz auch in schwer zugänglichen Bereichen (Bauwerkshinterfüllungen, Leitungsgräben)
- im Gegensatz zum Plattendruckversuch nach DIN 18134 entfällt das Belastungswiderlager
- Gerät ist netzspannungsunabhängig
- keine Anforderung an Ausbildung und Zulassung von Transport- und Bedienpersonal (vgl. radiometrische Meßverfahren)
- relativ geringer Kostenaufwand für das Gerät.

Nach der Technischen Prüfvorschrift [12] ist das Prüfverfahren vornehmlich für grob- und gemischtkörnige Böden mit einem Größtkorn bis 63 mm geeignet. Feinkörnige Böden müssen mindestens eine steife Konsistenz besitzen. Im Zweifelsfall ist, ebenso bei gemischtkörnigen Böden, der Wassergehalt des Bodens bis in eine Tiefe vom 1,5-fachen des Plattendurchmessers unter der Oberfläche zu bestimmen. Das Regelwerk, das im Interesse einer Vereinheitlichung verschiedener Gerätetypen und -abmessungen erstellt wurde, beinhaltet weder Angaben zu Grenzwerten noch Hinweise zu Vergleichsuntersuchungen mit anderen Prüfverfahren.

4.5.6.2 Grenzwerte und Vergleichsuntersuchungen

Die FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (1993) hat über den Arbeitsausschuß 5.5 "Prüftechnik" eine Bearbeitergruppe eingesetzt, da Grenzwerte und Vergleichsuntersuchungen auch im Hinblick auf die Aufnahme des dynamischen Plattendruckversuches als Prüfverfahren in die ZTVE-StB 93 von besonderer Bedeutung sind. Durch Vergleichsuntersuchungen im Feld soll festgestellt werden, ob "für die Beurteilung

der Ergebnisse von dynamischen Plattendruckversuchen eine bodengruppenbezogene Grenzwerttabelle aufgestellt werden kann, die Angabe von Anforderungswerten möglich ist, oder ob ein jeweils baustellenbezogener, bodenartabhängiger Zusammenhang hergestellt werden muß".

WEINGART (1991) berichtet von Mindestanforderungen der Deutschen Reichsbahn an den dynamischen Verformungsmodul des Planums, die für die Bauabnahme sowohl beim Neubau als auch bei der Rekonstruktion von Eisenbahnstrecken Anwendung finden (Tabelle 10).

	E_{vd} [MN/m²]
Unterbauplanum:	
Bindiger Boden	20
Nichtbindiger Boden $U \leq 3$	40
Nichtbindiger Boden $U > 3$	45
Schutzschichtplanum:	
Dicke der Schutzschicht $d \geq 30$ cm	
gut abgestufte Kiessande	40
normal abgestufte Kiessande	35
Dicke der Schutzschicht $d < 30$ cm	
gut abgestufte Kiessande	35
normal abgestufte Kiessande	30
Dicke der Schutzschicht $d \geq 15$ cm über Kalkstabilisierung	
gut abgestufte Kiessande	40
normal abgestufte Kiessande	35

Tabelle 10: Mindestanforderungen der Deutschen Reichsbahn an den dynamischen Verformungsmodul des Planums (nach WEINGART, 1991)

Zum Zusammenhang der Bodenkennwerte Verformungsmodul E_{vd} aus dem dynamischen, Verformungsmodul E_{v2} aus dem statischen Plattendruckversuch und dem Verdichtungsgrad D_{Pr} sind einige Untersuchungsergebnisse, die noch mit einem von der Prüfvorschrift [12] geringfügig abweichendem Gerätetyp erzielt wurden, bekannt. Die Vorgehensweise ist in FLOSS & KUDLA (1990) bzw. KUDLA et al. (1991) dokumentiert. Darauf basierend liegen folgende Aussagen bzw. Zuordnungen vor (RATIONALISIERUNGSGESELLSCHAFT LEITUNGSTIEFBAU MBH, 1991):

Genaue Zuordnungen der Verformungsmoduln können nur projektspezifisch aus direkten Vergleichsuntersuchungen abgeleitet werden. Die in Tabelle 11 angegebenen Zahlenwerte sind nur näherungsweise Zuordnungen, so daß zugeordnete Anforderungswerte nur die Bedeutung

von Richtwerten haben. Bei den grobkörnigen Bodenarten nehmen die Verformungsmoduln aus statischen und dynamischen Lastplattenversuchen mit der Ungleichförmigkeit der Kornabstufung und mit der Scharfkantigkeit der Korn- bzw. Steinaggregate zu.

Bodengruppen	D_{Pr} [%]	E_{v2} [MN/m²]	E_{vd} [MN/m²]
GW	103 100 97	120 100 80	75 55 45
GE - GI SE - SI - SW	100 97 95	80 60 45	30 20 15

Tabelle 11: Zuordnung von Verformungsmoduln für grobkörnige Bodenarten (nach RATIONALISIERUNGSGESELLSCHAFT LEITUNGSTIEFBAU MBH, 1991)

Für alle gemischt- und feinkörnigen Bodenarten wächst mit zunehmendem Feinkornanteil der Einfluß des Wassergehaltes. Zur Zuordnung der Verformungsmoduln können demnach bis zum Vorliegen weiterer Erfahrungswerte nur grobe Angaben gemacht werden. Für Böden bis 15 % Feinkornanteil kann Tabelle 11, letzte Zeile angenommen werden und für die übrigen Bodenarten sind die nach ZTVE-StB 76 [10] für E_{v2} angegebenen Werte auch auf E_{vd} übertragbar (Tabelle 12).

Porenanteil n [%]	Wassergehalt w [%]	E_{v2} - Modul [MN/m²]
$n \leq 30$ $30 < n \leq 36$ $n \geq 36$	$7 \leq w \leq 15$ $10 \leq w \leq 20$ $w \geq 15$	$E_{v2} \geq 45$ $20 < E_{v2} < 45$ $E_{v2} \leq 20$

Tabelle 12: Näherungsweise Zuordnung von Porenanteil n, Wassergehalt w und E_{v2} - Modul bei fein- und gemischtkörnigen Bodenarten mit einem Luftgehalt von $n_a \leq 12$ % (ZTVE-STB 76 [10])

4.5.6.3 Dichtungsbau

Für die im mineralischen Dichtungsbau eingesetzten Materialien, gemischt- und feinkörnige Böden, sind folglich genaue Zusammenhänge aufgrund des Einflusses des Wassergehaltes nicht bekannt. Hier liegt eine Parallele zu den noch nicht einsatzbereiten flächendeckenden Prüfverfahren mit walzenintegrierten Meßmethoden vor (Kap. 3). Gemäß den genannten Vorteilen im Hinblick auf den allgemeinen Prüfablauf und die spezielle Gerätetechnik wäre ein Geräteeinsatz im Dichtungsbau als optimal zu bewerten.

Die wesentliche Grundvoraussetzung nach Prüfvorschrift [12], die Böden müssen eine mindestens steife Konsistenz besitzen, ist erfüllt. Tabelle 13 zeigt für verschiedene Dichtungsmaterialien eine Gegenüberstellung der Wassergehalte an den Zustandsgrenzen flüssig → breiig → weich → steif → halbfest mit den Einbauwassergehalten im Feld. Gemäß der Forderung der NRW-Richtlinie [5] und der GDA-Empfehlungen [6] liegt eine steife Konsistenz vor (Kap. 2).

Bodengruppe nach DIN 18196	Anzahl der Versuche	Zustandswassergehalte				Einbaugrenzwerte		
		w_P [-] halbfest -steif	w [-] steif-weich	w [-] weich-breiig	w_L [-] breiig-flüssig	ρ_{Pr} [t/m³]	D_{Pr} [-]	$w_{Pr} \leq w \leq w_{0,95bzw.0,97Pr}$ [-]
TA	18	0,275 (0,023)	0,402	0,528	0,781 (0,041)	1,300	0,95	$0,340 \leq w \leq 0,400$
TA	13	0,266 (0,026)	0,389	0,512	0,757 (0,026)	1,400	0,95	$0,330 \leq w \leq 0,390$
TA	09	0,234 (0,013)	0,356	0,479	0,723 (0,028)	1,500	0,97	$0,260 \leq w \leq 0,310$
TL	40	0,131 (0,008)	0,178	0,226	0,320 (0,030)	1,813	0,97	$0,150 \leq w \leq 0,180$
TL	06	0,108 (0,015)	0,138	0,168	0,227 (0,020)	2,020	0,95	$0,105 \leq w \leq 0,135$

Tabelle 13: Zustands- und Einbauwassergehalte für verschiedene Dichtungsmaterialien, Daten von Baumaßnahmen (in Klammern: Standardabweichung)

Auch die Neigungsverhältnisse in situ (Kap. 2) führen nicht zu einer Einsatzeinschränkung, wenn man vom böschungsparallelen Einbau am Hang absieht. Die Neigung der Lastplatte darf nach TGL 11461/10 [9] und WEINGART (1991) 5 % nicht überschreiten, weil durch die Stoßbelastung eine seitliche Verschiebung auftritt und zu falschem Meßergebnis führt.

4.6 Folgerung

Dem Optimierungsansatz (Kap. 3.4) entsprechend sind die diskutierten zerstörungsfreien Meßverfahren bezüglich der Kriterien 'zerstörungsfrei' und 'schnell bzw. flächendeckend' wie folgt zu bewerten (Tabelle 14):

	radiometrisch		statisch		dynamisch	
Kriterium	Wasser-gehalt	Dichte	Wasser-gehalt	Verformung	Wasser-gehalt	Verformung
"zerstörungsfrei"	+	+ Aufsetzsonde - Einstichsonde (Regelfall)	/	+ eigentliche Messung - Befahrung	/	+
"schnell bzw. flächendeckend"	+	+	/	-	/	+

Tabelle 14: Bewertung der zerstörungsfreien Meßverfahren

+ Kriterium erfüllt

- Kriterium nicht erfüllt

/ nicht meßbar

Die nachfolgenden praktischen Untersuchungen umfassen daher Messungen mit den radiometrischen Meßverfahren (Kap. 5) und einem dynamischen Meßverfahren (Kap. 6). Dabei wird aus den in Kap. 4.5.6.3 genannten Gründen auf den dynamischen Plattendruckversuch mit Hilfe des Leichten Fallgewichtsgerätes zurückgegriffen.

5. MESSUNGEN MIT DEM RADIOMETRISCHEN VERFAHREN

5.1 Allgemeines

Das radiometrische Meßverfahren ist grundsätzlich als Kontrollprüfung für die Einbauqualität einer mineralischen Dichtung anerkannt (Kap. 2). Dabei wird im Regelfall ein Bohrloch über die gesamte Lagendicke angelegt - zerstörende Prüfung -, um den Dichtenachweis für verschiedene Tiefenbereiche führen zu können. In diesem Teil der Arbeit wird untersucht, inwieweit das Meßverfahren für einen Einsatz im vollkommen zerstörungsfreien Betrieb geeignet ist.

Im Rahmen der sukzessiven Erweiterung einer Hausmülldeponie, Fläche ca. 4,3 ha, wurde während der gesamten Bauzeit, die sich über drei Jahre erstreckte, ein in unmittelbarer Nähe anstehender, leicht plastischer Ton als Grundmaterial für die mineralische Basisabdichtung eingesetzt. Zur Vergütung wurde ein Bentonit bestimmter Sorte zugegeben (Kap. 5.2).

Während im ersten Teil der Baumaßnahme die Materialaufbereitung im Feld stattfand, kam im zweiten Teil eine stationäre Anlage zum Einsatz. Die Bentonitzugabemenge erhöhte sich von 3 % auf 5 %. Da die Art der Aufbereitung einen entscheidenden Einfluß auf die Meßwerte und die zerstörungsfreie Prüfbarkeit besitzt, wird nachfolgend zwischen "Aufbereitung im Feld" (Kap. 5.3) und "Aufbereitung in stationärer Anlage" (Kap. 5.4) unterschieden.

Die Qualitätssicherung der Herstellung der mineralischen Dichtung beinhaltet Kontrollprüfungen mit dem Ausstechzylinder-Verfahren nach DIN 18125, Teil 2 und dem radiometrischen Meßverfahren. Bei den Untersuchungen wurde die kombinierte Aufsetz- und Einstichsonde des Typs 3411-B der Firma TROXLER ELECTRONICS GMBH, Triangle Park, North Carolina (USA) / Alling bei München eingesetzt. Zur Feuchtebestimmung ist eine Neutronenquelle, Americium-241-Beryllium mit einer Aktivität von 1480 MBq (40 mCi), ortsfest am Sondenboden angeordnet. Zur Dichtebestimmung befindet sich an der Spitze der Strahlerstange eine Gammaquelle Cäsium-137 mit einer Aktivität von 296 MBq (8 mCi). Das Meßgerät wurde von speziell ausgebildetem und erfahrenem Personal bedient. Die in regelmäßigen Abständen überprüfte Geräteeinstellung garantierte eine optimale Übereinstimmung mit den in herkömmlichen Verfahren (Mikrowelle, Ausstechzylinder) bestimmten Einbaukennwerten.

Zur Vergleichbarkeit der Meßergebnisse sind damit wesentliche Randbedingungen eingehalten:

- Bodenkennwerte des Grundmaterials
- getrennt für beide Aufbereitungsverfahren:
  bauausführende Firma, Geräte- und Personaleinsatz
- Personal und Prüfmethodik im Rahmen der Qualitätsprüfung.

Die Ergebnisse der Messungen an insgesamt 586 Meßpunkten wurden ohne Unterscheidung vor oder nach Sanierung vollständig in das Auswerteprogramm aufgenommmen, da der zu sanierende Anteil minimal war und eine Zuordnung Meßpunkt → Bezugsfläche ohnehin nicht möglich ist. Auch auf eine Differenzierung Sohlprüfung/Böschungsprüfung (Einbau in horizontalen Lagen) kann verzichtet werden, zumal der Anteil der Untersuchungen für beide Aufbereitungsverfahren jeweils ca. 50 % beträgt. Der Gammastrahler wurde jeweils in zwei Meßtiefen positioniert, einer im oberflächennahen Bereich und einer in einer Tiefe von 25 cm, die der Lagendicke entspricht.

Für die Auswertung der Ergebnisse der Dichtemessungen ist der Bezug auf Proctordichten im wesentlichen nicht erforderlich. Durch diese von den Proctorbezugswerten entkoppelte Betrachtungsweise kann die gesamte Problematik, die mit der Materialaufbereitung, der Versuchsdurchführung und der Auswertung des Proctorversuches sowie der Festsetzung eines für die Herstellung und Prüfung einer mineralischen Dichtung maßgebenden Bezugwertes der Trockendichte zusammenhängt, unberücksichtigt bleiben.

5.2 Mineralisches Dichtungsmaterial

5.2.1 Klassifikation

Die Bodenkennwerte zur Klassifikation des mineralischen Dichtungsmaterials sind in Tabelle 15 gegenübergestellt.

Die untersuchten Proben für die insgesamt eingebauten etwa 47.500 m³ mineralische Dichtung weisen entsprechend den Voruntersuchungen in der Abbaugrube nur geringe Schwankungen in den Materialkennwerten auf. Der einzige Einfluß, der aus den beiden Bauverfahren resultiert, besteht in der unterschiedlichen Bentonitzugabemenge, 3 % bei Aufbereitung im Feld und 5 % bei Aufbereitung in der stationären Anlage.

Diese Zugabedifferenz kann sogar durch die Bestimmung des Tonanteils tendenziell bestätigt werden und spiegelt sich auch im Wasseraufnahmevermögen nach Enslin/Neff wider. Die Massenunterschiede im Übergangsbereich Schluff/Sand sind in erster Linie verfahrensbedingten Ungenauigkeiten zuzuschreiben (s.a. DIN 18123).

Mit den angegebenen Fließgrenzen und Plastizitätszahlen ist das Bodenmaterial entsprechend der Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke nach DIN 18196 als leicht plastischer Ton TL einzuordnen.

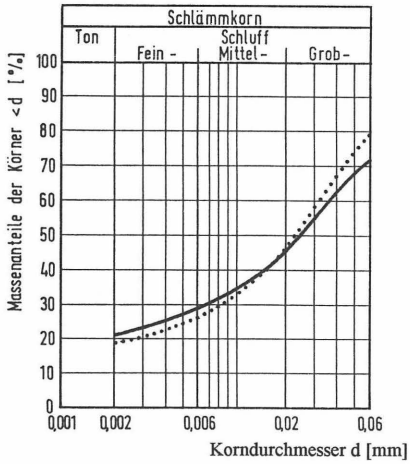
		altes Bauverfahren Aufbereitung im Feld	neues Bauverfahren Aufbereitung in stationärer Anlage
Korngrößenverteilung (durch Sedimentation)		Signatur: ·····	Signatur: ——
			
$m < 0{,}002$ mm ($= m_T$)	[%]	18,7 / 2,7	21,4 / 2,3
$m < 0{,}006$ mm ($= m_{T,fU}$)	[%]	25,6 / 2,8	28,7 / 2,2
$m < 0{,}020$ mm ($= m_{T,fU,mU}$)	[%]	46,3 / 3,5	45,3 / 3,4
$m < 0{,}060$ mm ($= m_{T,U}$)	[%]	79,2 / 5,4	71,1 / 9,5
		(39)	(40)
Fließgrenze w_L	[-]	0,319 / 0,018	0,320 / 0,030
Ausrollgrenze w_P	[-]	0,136 / 0,009	0,131 / 0,008
Plastizitätszahl I_P	[-]	0,183 / 0,020	0,189 / 0,031
		(19)	(40)
Kalkgehalt V_{Ca}	[-]	0,174 / 0,027 (18)	0,186 / 0,021 (17)
Glühverlust V_{gl}	[-]	0,030 / 0,006 (13)	0,023 / 0,002 (07)
Wasseraufnahmevermögen w_b	[-]	0,493 / 0,035 (22)	0,555 / 0,049 (17)
Korndichte ρ_s	[g/cm³]	2,704 / 0,004 (04)	2,704 / 0,008 (07)

Tabelle 15: Kennwerte des mineralischen Dichtungsmaterials
Zahlenangaben: Mittelwert / Standardabweichung (Anzahl der Untersuchungen)

Tonmineralogische Untersuchungen der Tonfraktion haben einen mittleren Anteil von etwa 40 % Montmorillonit, 15 % Illit und 20 % Kaolinit bezogen auf die Tonfraktion ergeben.

5.2.2 Verdichtungseigenschaften

Die Verdichtungseigenschaften des mineralischen Dichtungsmaterials wurden in Proctorversuchen nach Prüfung DIN 18127 - P 100 X baubegleitend ermittelt. Bild 15 zeigt die sich aus den einzelnen Teilversuchen ergebende Streubreite.

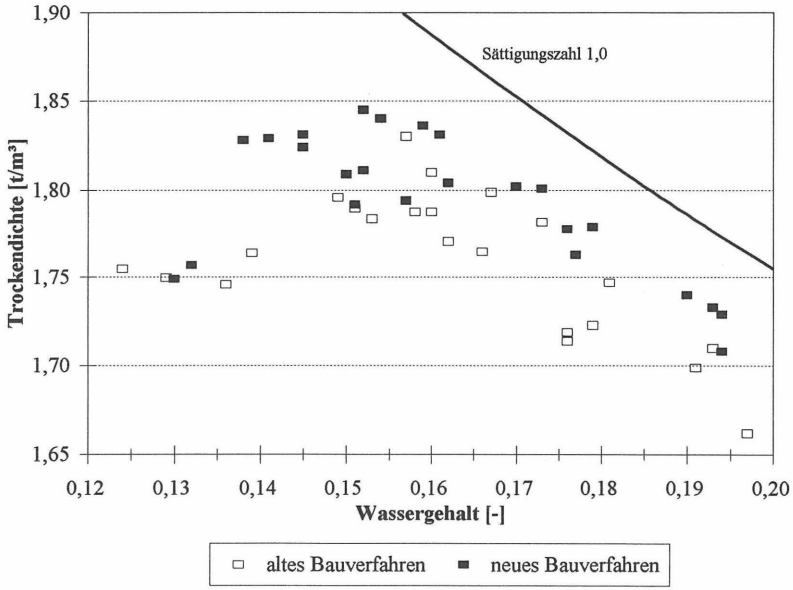


Bild 15: Streubreite der Verdichtungseigenschaften des leicht plastischen Tons

Aus den Proctordichten und den optimalen Wassergehalten der im selben Labor durch verschiedene Laboranten durchgeführten Versuchsreihen ergibt sich eine mittlere Proctordichte von $\rho_{Pr,m}$ = 1,818 t/m³ und ein mittlerer optimaler Wassergehalt von $w_{Pr,m}$ = 0,153. Die Standardabweichungen von σ ($\rho_{Pr,m}$) = 0,020 t/m³ und σ ($w_{Pr,m}$) = 0,005 liegen im Rahmen der nach DIN 18127 angegebenen Werte von σ_r = 0,01 t/m³ (Versuchsdurchführung im selben Labor durch denselben Laboranten) bzw. σ_R = 0,025 t/m³ (Versuchsdurchführung in verschiedenen Labors durch verschiedene Laboranten) für die Proctordichte und von σ_r = 0,005 bzw. σ_R = 0,007 für den optimalen Wassergehalt einer gemischt- oder feinkörnigen Bodenart.

5.3 Aufbereitung im Feld

5.3.1 Herstellungsvorgang

Nach Einbringung und höhengerechter Verteilung des Grundmaterials aus der Abbaugrube wird der Bentonit mit einem Streuwagen bei regelmäßiger Kontrolle der Streumenge aufgebracht. Zur zunächst groben Untermischung des Bentonits in den darunterliegenden Boden hat sich der Einsatz eines Grubbers bewährt. Die eigentliche Zerkleinerung und Homogenisierung wird mit einer den landwirtschaftlichen Fräsen deutlich überlegenen Hochleistungsfräse vorgenommen, wobei die oberen Zentimeter der unteren Lage zur Verbesserung der Verzahnung mit angerissen werden. Im Regelfall müssen zur Einstellung des Wassergehaltes zwei Überfahrten mit dem Wasserwagen vorgenommen werden. Dieses ist grundsätzlich im Einbaufeld möglich, da lokal über die Lagendicke eine gleichmäßige Verteilung des Wassergehaltes in dem relativ feinstrukturierten Material nachgewiesen werden konnte. Nach zwei weiteren Fräsüberfahrten ist das Dichtungsmaterial mit dieser Herstellungsmethode optimal für die anschließende Verdichtung mit 11 t - Glattmantelwalzen in 6 Überfahrten aufbereitet.

5.3.2 Prüfumfang

Der Prüfumfang der Untersuchungen mit dem radiometrischen Meßverfahren ist in Tabelle 16 angegeben.

		Sohle	Böschung	gesamt
Einbauvolumen V	[m³]	23.000 (4 · 23.000 m² · 0,25 m)	6.700	29.700
Meßpunkte				
Anzahl n	[-]	206	184	390
Parameter	[-]	Wassergehalt	Wassergehalt	Wassergehalt
	[t/m³]	Dichte: Tiefe t = 10 cm Tiefe t = 25 cm	Dichte: Tiefe t = 10 cm Tiefe t = 25 cm	Dichte: Tiefe t = 10 cm Tiefe t = 25 cm
Meßpunkt/V	[1/m³]	1 / 112	1 / 36	1 / 76

Tabelle 16: Prüfumfang der radiometrischen Messungen bei Aufbereitung im Feld

5.3.3 Auswertung der Wassergehaltsmessungen

Das radiometrische Meßverfahren zur Wassergehaltsbestimmung stellt bereits während der Materialaufbereitung eine sinnvolle Methode zum quantitativen Nachweis mangelhafter Teilvolumina dar. Durch einfache Aufsetzmessungen kann unmittelbar vor Ort entschieden werden, ob in Teilbereichen - die Problematik "Zuordnung Meßpunkt → Bezugsfläche" ist unter Berücksichtigung ungleichen Ausgangswassergehaltes entsprechend zu beachten - weitere Überfahrten mit dem Wasserwagen erforderlich sind oder, ob das Material über das zulässige Maß befeuchtet wurde und daher bereits vor der Verdichtung auszutauschen ist.

Zur Qualitätsprüfung der fertiggestellten Dichtung wurden an insgesamt 390 Meßpunkten Wassergehalts- und Dichtebestimmungen mit dem radiometrischen Meßverfahren durchgeführt. Da jeweils die Dichte in zwei Meßtiefen bestimmt wurde, liegen auch zwei Meßergebnisse des Wassergehaltes vor (Meßzeit jeweils eine Minute). Für die weitere Datenverarbeitung wird jedem Meßpunkt der aus beiden Wassergehalten gemittelte Wassergehalt zugeschrieben (vgl. KNÜPFER, 1990).

Bild 16 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Wassergehalte. Die Zahlenwerte sind in 17 Klassen von $0{,}115 < w_1 \leq 0{,}120$, $0{,}120 < w_2 \leq 0{,}125$ usw. bis $0{,}195 < w_{17} \leq 0{,}200$ zusammengefaßt und als relative Häufigkeit bezogen auf die Gesamtmeßpunktanzahl aufgetragen. Die Klassenbreite beträgt einheitlich $w = 0{,}005$.

Die gemessenen Wassergehalte treten mit $w_{min} = 0{,}120$ bis $w_{max} = 0{,}192$ in einer großen Spannweite auf. Der Hauptanteil liegt mit einer Häufigkeit von jeweils etwa 15 % in den 4 Klassen von $w = 0{,}145$ bis $w = 0{,}165$.

Die Häufigkeit der Werte innerhalb und außerhalb der Grenzwassergehalte hängt vom jeweils festgelegten "optimalen Wassergehalt" und dem "Wassergehalt beim Mindestverdichtungsgrad (nasse Seite der Proctorkurve)" ab. Setzt man diese Werte zu $w_{Pr} = 0{,}150$ und $w_{0,95Pr} = 0{,}180$ an, die in etwa dem Einbauziel während der Baumaßnahme entsprechen (vgl. Bild 15), so liegt trotz größter Sorgfalt bei der Herstellung fast jeder dritte Wert außerhalb dieser Grenzen und zwar vornehmlich auf der trockenen Seite.

Ein ähnliches Bild der Häufigkeitsverteilung zeigt sich bei den Wassergehalten, die durch Schnelltrocknung im Mikrowellenherd nach DIN 18121, T.2 im Zusammenhang mit der Entnahme von Ausstechzylinderproben bestimmt wurden (Bild 17).

Die statistischen Kenngrößen Mittelwert und Standardabweichung stimmen für die nach beiden Meßverfahren ermittelten Wassergehalte überein (Tabelle 17).

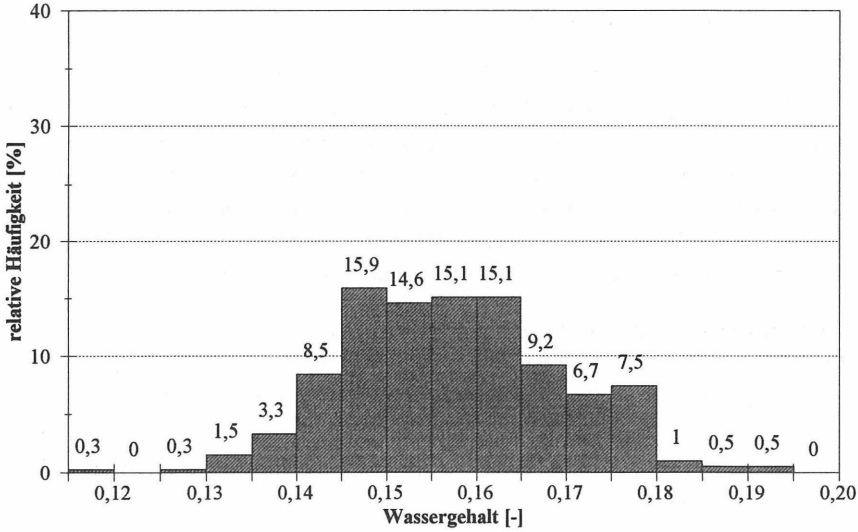


Bild 16: Häufigkeitsverteilung der Wassergehalte - Radiometrisches Verfahren (n = 390)

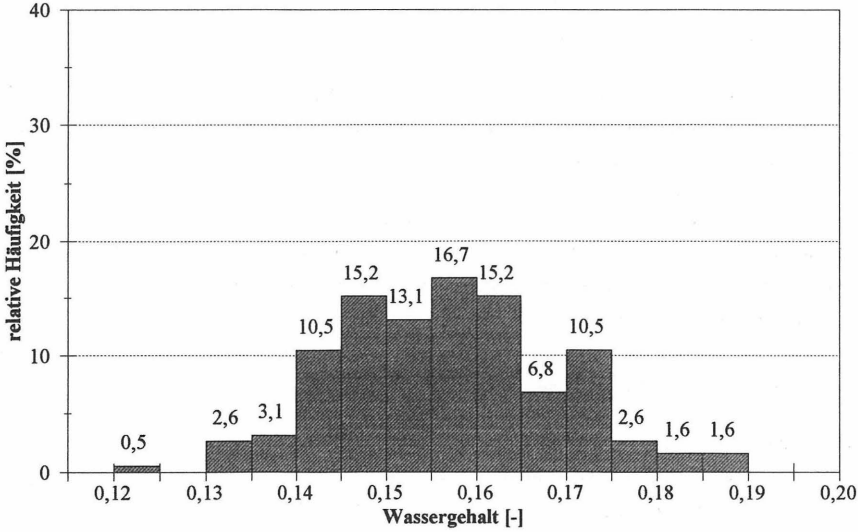


Bild 17: Häufigkeitsverteilung der Wassergehalte - Schnelltrocknung mit Mikrowellenherd (n = 191)

	Radiometrisches Verfahren	Mikrowellenherd
Anzahl der Untersuchungen	390	191
Mittelwert	0,157	0,157
Standardabweichung	0,012	0,012
Variationskoeffizient	0,075	0,075

Tabelle 17: Statistische Kenngrößen zur Bestimmung des Wassergehaltes
- Aufbereitung im Feld -

Anmerkung: Für die Bauausführung waren Einbauwassergehalte, die eher der trockenen Seite zuzuschreiben waren, im Regelfall nicht von kritischer Bedeutung bezüglich der Dichtwirkung. Im Vorfeld der Baumaßnahme (Eignungsprüfung und Versuchsfelder) konnte grundsätzlich und während der Baumaßnahme im einzelnen an den entnommenen Proben die Einhaltung des zum damaligen Zeitpunkt geforderten Durchlässigkeitsbeiwertes von $k \leq 1 \cdot 10^{-9}$ m/s nachgewiesen werden, besonders bei ausreichend geringem Luftporenanteil der Proben. Verbleibende Restflächen wurden nach herkömmlichem Schema überarbeitet.

Im Mittel entfallen auf eine Teilfläche bestimmter Größe zwei Prüfungen des Wassergehaltes mit dem radiometrischen Verfahren und eine Prüfung mit dem Mikrowellenherd. Zwar ist die Gesamtverteilung der gemessenen Wassergehalte praktisch identisch, jedoch tritt eine Gleichheit der Werte für die gleichzeitig hergestellten und beprobten Teilflächen nicht auf. Beispielhaft sind die Meßwerte für eine Fläche von ca. 2.100 m² einer Sohllage in Bild 18 dargestellt. Die Zuordnung Meßpunkt → Bezugsfläche ist nicht möglich (s. Kap. 3.3.2).

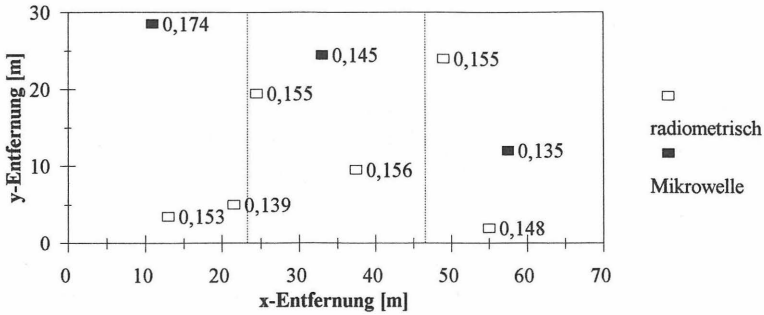


Bild 18: Vergleich der Wassergehaltsbestimmungen w [-] von drei Teilflächen

Die relativ große Streubreite der Meßergebnisse (vgl. Kap. 5.4.3) hängt unmittelbar mit dem Einbauverfahren zusammen. Die Problematik besteht zum einen in der genau flächendeckenden konstanten Dosierung der Wasserzugabe und zum anderen in den nicht auszuschließenden Bereichen lokaler Wasseransammlungen, z.B. innerhalb der Fahrspuren. Als zusätzliche Erschwernis traten zum Teil extreme Witterungsbedingungen, große Schwankungen der Tagestemperaturen und plötzliche Niederschläge, auf.

Die zerstörungsfreie Meßmethode mit dem radiometrischen Verfahren ermöglicht zur Früherkennung während der Materialaufbereitung und vor allem zur Qualitätssicherung fertiggestellter Dichtungsabschnitte eine rasche und zuverlässige Wassergehaltsbestimmung. Das Prüfraster ist im Prinzip beliebig verdichtbar. Dabei ist aber davon auszugehen, daß gleichzeitig - je nach Materialeigenschaften und Qualitätsanforderungen - der Nacharbeitungsaufwand erhöht wird, da bisher große Bezugsflächen durch kleinere Bezugsflächen, im "Idealfall" dem Meßpunkt (= flächendeckende Prüfung), ersetzt werden. Im Gegensatz zu dem dafür erforderlichen, nicht praktikablen Prüfungs- und Nacharbeitungsprogramm, mit sicherlich nachteiligen Beeinträchtigungen bereits ordnungsgemäß hergestellter Flächen, sollen zunächst die Auswirkungen einer optimierten Fertigungstechnik (Kap. 5.4) untersucht werden.

5.3.4 Auswertung der Dichtemessungen

Für den zerstörungsfreien Einsatz des radiometrischen Meßverfahrens zur Dichtebestimmung, dabei können nur oberflächennahe Messungen durchgeführt werden, ist der Nachweis einer ausreichenden Dichtegleichheit über die gesamte Lagendicke erforderlich. In der Praxis liegt im Regelfall eine geringere Verdichtung im unteren Drittel einer Lage vor, daher konzentriert sich die Beprobung schwerpunktmäßig auf diesen Bereich (s. Kap. 2).

Zur Quantifizierung der flächigen und tiefeabhängigen Dichteverteilung wurden an 390 Meßpunkten Dichtebestimmungen bei Strahlertiefen von 10 cm und 25 cm durchgeführt (Meßzeit jeweils eine Minute).

Die Bilder 19 und 20 zeigen die Häufigkeitsverteilungen der Trockendichten. Die Zahlenwerte sind in 13 Klassen von 1,64 t/m³ $< \rho_{d1} \leq$ 1,66 t/m³, 1,66 t/m³ $< \rho_{d2} \leq$ 1,68 t/m³ usw. bis 1,88 t/m³ $< \rho_{d13} \leq$ 1,90 t/m³ zusammengefaßt und als relative Häufigkeit bezogen auf die Gesamtmeßpunktanzahl aufgetragen. Die Klassenbreite beträgt einheitlich 0,02 t/m³.

Die Spannweite der gemessenen Trockendichten ist bei den 10 cm - Messungen geringer als bei den 25 cm - Messungen. In der größeren Meßtiefe nimmt die Trockendichte deutlich ab.

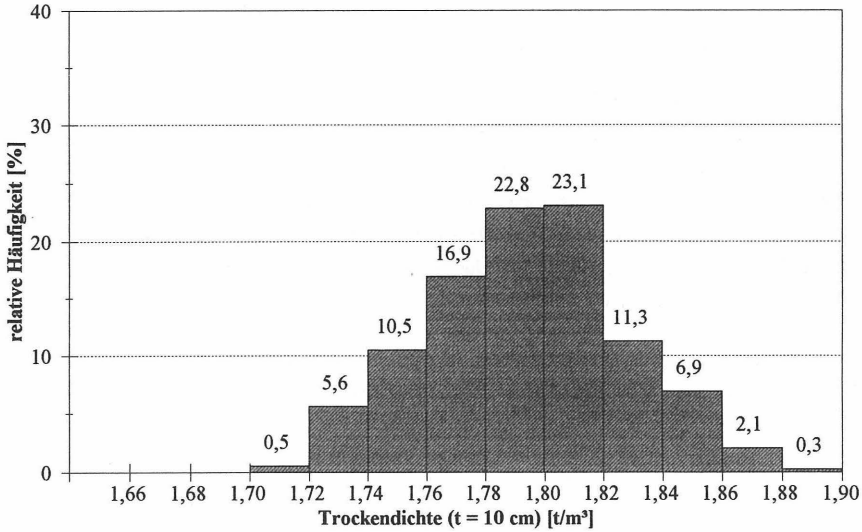


Bild 19: Häufigkeitsverteilung der Trockendichten bei Strahlertiefe t = 10 cm (n = 390)

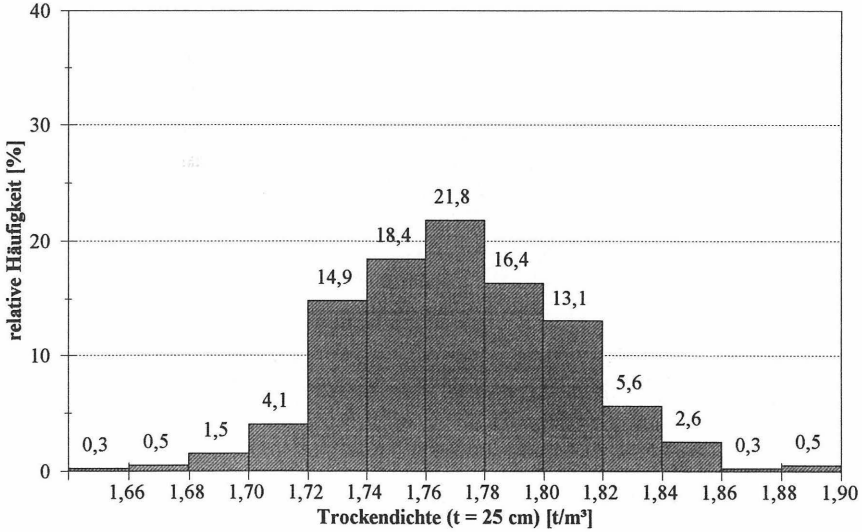


Bild 20: Häufigkeitsverteilung der Trockendichten bei Strahlertiefe t = 25 cm (n = 390)

Die aus den Einzelwerten ermittelten mittleren Trockendichten ergeben eine Differenz von ca. 23 kg/m³. Die statistischen Kenngrößen sind im einzelnen Tabelle 18 zu entnehmen.

Neben diesen Angaben zur flächigen Dichteverteilung, die Zuordnung Meßpunkt → Bezugsfläche ist ebensowenig möglich wie bei der Bestimmung des Wassergehaltes, ist im Hinblick auf eine zerstörungsfreie Prüfung die lokale Dichteverteilung, also direkt am Meßpunkt, entscheidend. In Bild 21 sind die Häufigkeitsverteilungen der Differenzen der in beiden Meßtiefen ermittelten Trockendichten aufgetragen. Die Zahlenwerte sind auf die praxisübliche Maßzahl "Verdichtungsgrad" umgerechnet, damit die lokalen Abweichungen anschaulicher quantifiziert werden können. Als Bezugsproctordichte ist ρ_{Pr} = 1,80 t/m³ gewählt (s. Bild 15).

Die für eine Strahlertiefe von t = 25 cm ermittelten Verdichtungsgrade sind bei ca. 80 % aller Meßpunkte geringer als bei Strahlertiefe t = 10 cm. Diese Differenz beträgt maximal 5,7 %. Im Gesamtmittel der Einzelwerte ergibt sich eine Abweichung von ΔD_{Pr} = 1,3 %. Die statistischen Kenngrößen sind im einzelnen Tabelle 18 zu entnehmen. Der Variationskoeffizient ist für die Differenzbetrachtung keine geeignete Kenngröße.

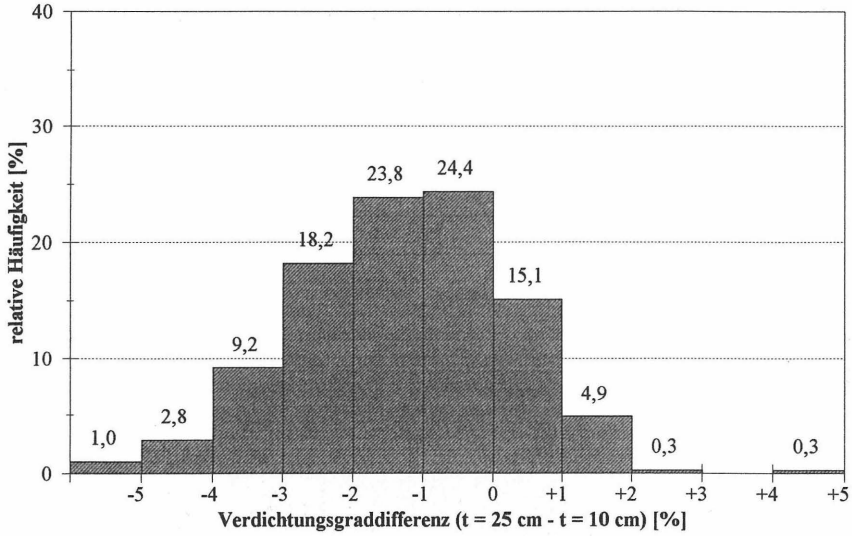


Bild 21: Häufigkeitsverteilung der Verdichtungsgraddifferenzen zwischen Strahlertiefe t = 25 cm und t = 10 cm (n = 390)

	Trockendichte ρ_d (t = 10 cm)	Trockendichte ρ_d (t = 25 cm)	Verdichtungsgraddifferenz D_{Pr} (t = 25 cm - t = 10 cm)
Mittelwert	1,794 t/m³	1,771 t/m³	- 0,013
Standardabweichung	0,033 t/m³	0,036 t/m³	0,015
Variationskoeffizient	0,018	0,020	-
Maximum	1,882 t/m³	1,883 t/m³	0,046
Minimum	1,713 t/m³	1,660 t/m³	- 0,057

Tabelle 18: Statistische Kenngrößen zur Bestimmung der Trockendichte
- Aufbereitung im Feld - (n = 390)

Die Streubreite der Meßergebnisse hängt unmittelbar mit dem Einbauverfahren zusammen. Die Problematik der optimalen Wassergehaltsverteilung wirkt sich auch direkt auf die erzielbare Gleichmäßigkeit der Trockendichten aus. Hinzu kommt eine nicht näher quantifizierbare, ungleichmäßige Verteilung der Aggregatgrößen des Dichtungsmaterials trotz intensiver Aufbereitungsbemühungen.

Dichtemessungen mit dem radiometrischen Verfahren, die ausschließlich auf einem zerstörungsfreien Betrieb basieren, sind unter den gegebenen Bedingungen aufgrund ungleichmäßiger Dichteverteilungen innerhalb der Lagendicke nicht sinnvoll. Die Dichteverhältnisse in dem zu prüfenden Dichtungsvolumen können nur durch zerstörende Messungen rasch und zuverlässig gemessen werden. Das Prüfraster ist unter Berücksichtigung der im Zusammenhang mit der Bestimmung des Wassergehaltes angesprochenen Auswirkungen auf das Nacharbeitungsprogramm grundsätzlich beliebig verdichtbar. Die Anwendbarkeit zerstörungsfreier Verdichtungsmessungen ist daher beim Einsatz optimierter Fertigungstechnik (Kap. 5.4) zu überprüfen.

5.4 Aufbereitung in stationärer Anlage

5.4.1 Herstellungsvorgang

Die Aufbereitung des Dichtungsmaterials findet in einer stationären Anlage auf dem Deponiegelände unmittelbar neben der Einbaufläche statt. Das angelieferte Grundmaterial wird mit einem Radlader in den Aufgabetrichter der Aufbereitungsanlage gefüllt und durch eine Schnecke, die einen kontinuierlichen Massenstrom gewährleistet, und ein Förderband mit Bandwaage zum Mischer transportiert. Eine Rechneranlage ermittelt aus den aufgenommenen Meßdaten des Massenstroms die erforderliche Bentonitzugabemenge und steuert die Zuführung aus dem Vorratssilo. Nachgeschaltet sind eine stationäre Hochleistungsfräse und eine auf der Grundlage der auf der Baustelle ermittelten Wassergehalte der Grundmaterialien ebenfalls elektronisch geregelte Wasserzugabeeinrichtung. Das aufbereitete Dichtungsmaterial wird zur Einbaustelle transportiert und mit lasergesteuerten Gradern in der erforderlichen Mächtigkeit verteilt. Die Untersuchungen an den Versuchsfeldern ergaben für die Verdichtung dieses Materials keine visuellen und quantifizierbaren Unterschiede zwischen gleichgewichtigen Glattmantel- und Stampffußwalzen. Für die Herstellung der eigentlichen Dichtung wurde eine 11 t - Stampffußwalze mit 6 Überfahrten eingesetzt.

5.4.2 Prüfumfang

Der Prüfumfang der Untersuchungen mit dem radiometrischen Meßverfahren ist in Tabelle 19 angegeben.

		Sohle	Böschung	gesamt
Einbauvolumen V	[m³]	10.000 (2 · 20.000 m² · 0,25 m)	7.800	17.800
Meßpunkte				
Anzahl n	[-]	94	102	196
Parameter	[-]	Wassergehalt	Wassergehalt	Wassergehalt
	[t/m³]	Dichte: Tiefe t = 05 cm Tiefe t = 25 cm	Dichte: Tiefe t = 05 cm Tiefe t = 25 cm	Dichte: Tiefe t = 05 cm Tiefe t = 25 cm
Meßpunkt/V	[1/m³]	1 / 106	1 / 76	1 / 91

Tabelle 19: Prüfumfang der radiometrischen Messungen bei Aufbereitung in stationärer Anlage

5.4.3 Auswertung der Wassergehaltsmessungen

Zur Qualitätsprüfung der fertiggestellten Dichtung wurden an insgesamt 196 Meßpunkten Wassergehalts- und Dichtebestimmungen mit dem radiometrischen Meßverfahren durchgeführt. Die Aufbereitung und Darstellung der Wassergehaltswerte erfolgt analog Kap. 5.3.3.

Bild 22 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Wassergehalte. Die gemessenen Wassergehalte treten mit $w_{min} = 0{,}145$ bis $w_{max} = 0{,}181$ in einer deutlich kleineren Spannweite gegenüber der Aufbereitung im Feld auf. Der Hauptanteil liegt mit einer Häufigkeit von über 50 % zwischen $w = 0{,}160$ und $w = 0{,}170$.

Unter Berücksichtigung der mit $k \leq 5 \cdot 10^{-10}$ m/s erhöhten Anforderung an den Durchlässigkeitsbeiwert und der damit zwangsweise verbundenen strengen Einhaltung des unteren Grenzwassergehaltes ($\approx w_{Pr}$) sowie der umfangreichen Erfahrungen mit der Feldaufbereitung bestand für die Aufbereitung in der stationären Anlage folgende Vorgabe für die Soll-Einstellung des Wassergehaltes: $\approx 0{,}155 \leq w_{Soll} \leq \approx 0{,}175$. Nach Bild 22 ist diesbezüglich ein hervorragendes Ergebnis erzielt worden. An nur fast 9 % der Meßpunkte wird die untere Wassergehaltsgrenze um maximal 1 % Wassergehalt unterschritten, und an knapp 6 % wird die obere Wassergehaltsgrenze um maximal 0,6 % Wassergehalt überschritten.

Ein ähnliches Bild der Häufigkeitsverteilung ergibt sich bei den Wassergehalten, die durch Schnelltrocknung im Mikrowellenherd nach DIN 18121, T.2 im Zusammenhang mit der Entnahme von Ausstechzylinderproben bestimmt wurden (Bild 23).

Auch hier zeigt sich bei den statistischen Kenngrößen Mittelwert und Standardabweichung für die nach beiden Verfahren ermittelten Wassergehalte eine hohe Übereinstimmung (Tabelle 20).

	Radiometrisches Verfahren	**Mikrowellenherd**
Anzahl der Untersuchungen	196	61
Mittelwert	0,165	0,166
Standardabweichung	0,007	0,007
Variationskoeffizient	0,041	0,043

Tabelle 20: Statistische Kenngrößen zur Bestimmung des Wassergehaltes
- Aufbereitung in stationärer Anlage -

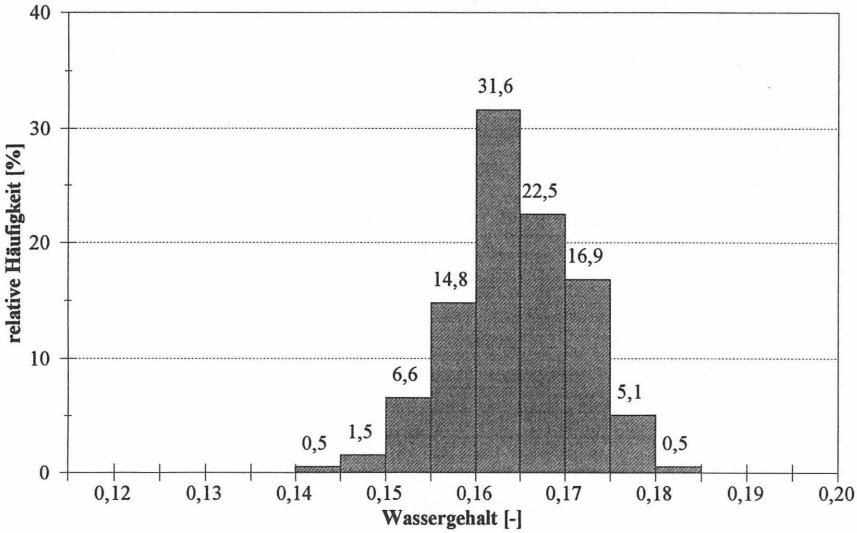


Bild 22: Häufigkeitsverteilung der Wassergehalte - Radiometrisches Verfahren (n = 196)

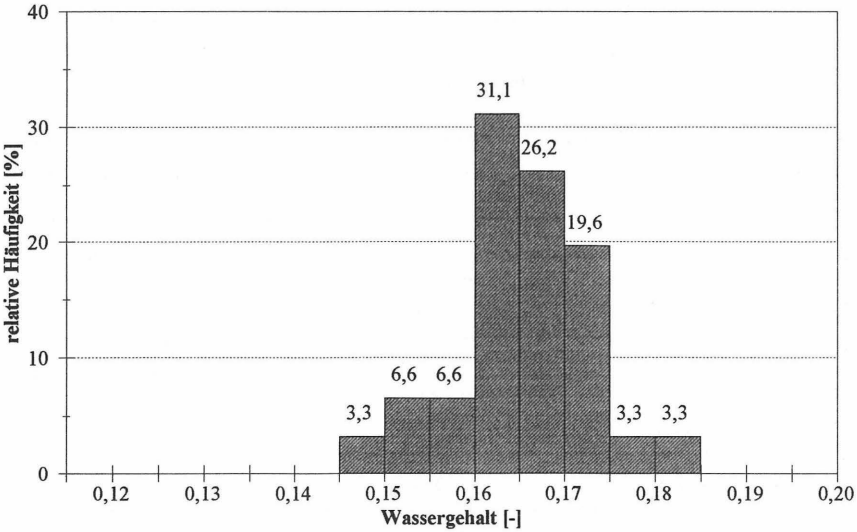


Bild 23: Häufigkeitsverteilung der Wassergehalte - Schnelltrocknung mit Mikrowellenherd (n = 61)

Die gegenüber der Feldaufbereitung deutlich geringere Streubreite der Meßergebnisse ist auf das verbesserte Aufbereitungs- und Einbauverfahren zurückzuführen. Das Dichtungsmaterial wird "flächendeckend" gleichmäßig befeuchtet und nur kurzfristig während der Verteilung und der Verdichtung im Einbaufeld den Witterungsbedingungen ausgesetzt.

Die Problematik der Zuordbarkeit Meßpunkt → Bezugsfläche bleibt grundsätzlich auch hier bestehen. Sie verliert jedoch infolge der Vergleichmäßigung des Feuchtezustandes gegenüber der Aufbereitung im Feld an Bedeutung. Von den 196 Meßwerten liegt keiner außerhalb der insgesamt tolerierbaren Grenzwassergehalte und aufgrund der Ergebnisse anderer Prüfinstitutionen und des visuell insgesamt hervorragenden Eindrucks sind keine Beanstandungen zu befürchten. Damit kann natürlich keine Aussage darüber getroffen werden, wie groß dennoch die Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein von Fehlstellen ist.

5.4.4 Auswertung der Dichtemessungen

Die im Zusammenhang mit der Aufbereitung des Dichtungsmaterials im Feld gesammelten Erfahrungen und Ergebnisse einerseits sowie die umfangreichen Untersuchungen anläßlich der Probeläufe der stationären Aufbereitungsanlage und des probeweisen Einbaus des Materials in Versuchfeldern andererseits geben hinsichtlich der Prüfung der Einsetzbarkeit der zerstörungsfreien Dichtebestimmung mit dem radiometrischen Meßverfahren Anlaß zu folgendem Gedankenexperiment:

Das Dichtungsmaterial wird durch die automatisierte Aufbereitungstechnik hinsichtlich der Gleichmäßigkeit und Feinheit der Aggregate deutlich verbessert. Damit liegen optimale Bedingungen für eine hochwertige Verdichtung vor. Es wird davon ausgegangen, daß pro Meßpunkt eine ausreichende Dichtegleichheit über die gesamte Lagendicke vorliegt. Wenn also bei einer zerstörungsfreien Messung der Dichte, die sich auf den oberflächennahen Bereich bezieht, ein Ergebnis erzielt wird, das den Anforderungen genügt, so wird auch in größerer Meßtiefe ein gleich gutes oder zumindest ein befriedigendes Ergebnis erwartet. Dabei ist u.U. die Definition einer Sicherheitsreserve erforderlich. Um die Erwartungen an die prognostizierten Ergebnisse konkret zu bestätigen, wird im Anschluß an die oberflächennahe Messung die Tiefenmessung zum Nachweis durchgeführt. Damit liegt quasi ein überdimensionales Versuchsfeld vor, das aber durch diese Art der Beprobung trotzdem anforderungsgerecht geprüft wird.

Für die Dichtemessung im oberflächennahen Bereich einer Lage wird die Sonde nicht im Aufsetzbetrieb sondern mit einer Einstichtiefe des Strahlers von 5 cm betrieben. Das hat den entscheidenden Vorteil, daß Meßungenauigkeiten infolge des unmittelbaren Oberflächeneinflusses minimiert werden und ist zudem noch mit der Bedingung an eine zerstörungsfreie Messung

verträglich, weil die Oberflächen der Lagen zur besseren Verzahnung der Lagen untereinander oftmals ohnehin angefräst werden. Sollte das nicht der Fall sein, so kann das relativ kleine Loch mit angemessen aufbereitetem Dichtungsmaterial sicher und schnell verstopft werden. Der bei Einstichtiefen von 25 cm zu betreibende Aufwand, in der NRW-Richtlinie [5] wird das Aufgraben eines größeren Bereiches mit anschließendem Wiederverfüllen vorgeschlagen oder auch die lagenweise Einpressung von Dichtungsmaterial (s. Kap. 5.6), ist nicht erforderlich.

Die Aufbereitung und Darstellung der Dichtemessungen an den insgesamt 196 Meßpunkten erfolgt analog Kap. 5.3.4. Die statistischen Kenngrößen für die in beiden Meßtiefen ermittelten Trockendichten enthält Tabelle 21.

Bild 24 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Trockendichte bei der Strahlertiefe von 5 cm. An ca. 85 % der Meßpunkte liegen die Trockendichten im Bereich von 1,76 t/m³ < $\rho_d \leq$ 1,82 t/m³. Die mittlere Trockendichte von ρ_{dm} (t = 05 cm) = 1,79 t/m³ entspricht in etwa der angesetzten Bezugsproctordichte von ρ_{Pr} = 1,80 t/m³. Selbst die kleinste gemessene Trockendichte von ρ_{dmin} (t = 05 cm) = 1,735 t/m³ weist einen Verdichtungsgrad von D_{Pr} > 0,96 auf, so daß an allen Meßpunkten ein geforderter Verdichtungsgrad von $D_{Pr} \geq$ 0,95 sicher erreicht wird.

Die bei der Strahlertiefe von 25 cm erzielten Meßergebnisse sind in Bild 25 dargestellt. Die Annahme der erzielbaren Dichtegleichheit über die gesamte Lagendicke wird bestätigt. Auch hier sind ca. 85 % der Meßwerte im Intervall 1,76 t/m³ < $\rho_d \leq$ 1,82 t/m³ anzutreffen. Die mittlere Trockendichte von ρ_{dm} (t = 25 cm) = 1,791 t/m³ ist quasi identisch der für den oberflächennahen Bereich ermittelten. Die minimale Dichte ρ_{dmin} (t = 25 cm) = 1,705 t/m³ erfüllt mit D_{Pr} = 0,95 die Anforderungen an den Verdichtungsgrad.

Die statistischen Kenngrößen weisen für die in beiden Meßtiefen ermittelten Trockendichten eine hohe Übereinstimmung auf (Tabelle 21). Ein Vergleich zur Feldaufbereitung (Tabelle 18) zeigt bei den Mittelwerten eine gute Übereinstimmung mit der Trockendichte ρ_{dm} (t = 10 cm), in der Meßtiefe von t = 25 cm wird eine um etwa ΔD_{Pr} = 1,3 % geringere Verdichtung erzielt. Die erhöhte Gleichmäßigkeit der Einbaueigenschaften bei stationärer Materialaufbereitung spiegelt sich in den nahezu tiefeunabhängigen Standardabweichungen durch eine Reduzierung von s_{Feld} = 0,035 t/m³ auf $s_{Stat.}$ = 0,022 t/m³ wider. Dieses Maß der Abweichungen vom Mittelwert ist damit um etwa ein Drittel reduziert worden.

Die Analyse der lokalen Dichteverteilungen mittels Häufigkeitsverteilung der Verdichtungsgraddifferenzen ist in Bild 26 dargestellt (vgl. Bild 21). An nur 1,5 % der Meßpunkte treten um mindestens 3 % schlechtere Verdichtungsgrade (maximal 4,9 %) in größerer Meßtiefe auf, bei Aufbereitung im Feld liegt dieser Prozentsatz bei immerhin 13 %.

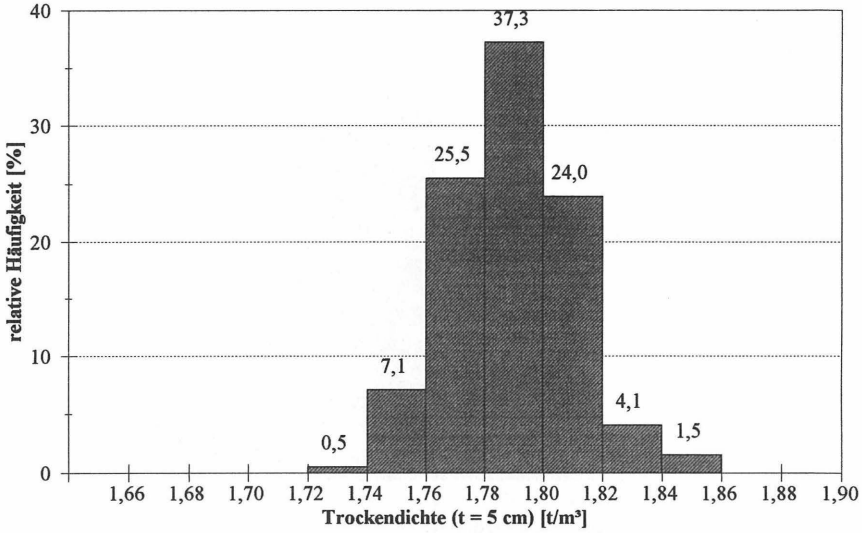


Bild 24: Häufigkeitsverteilung der Trockendichten bei Strahlertiefe t = 5 cm (n = 196)

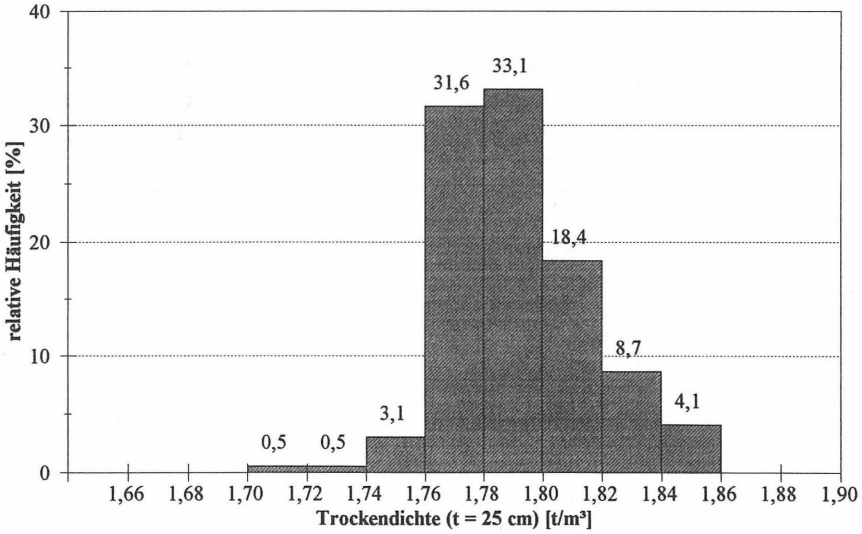


Bild 25: Häufigkeitsverteilung der Trockendichten bei Strahlertiefe t = 25 cm (n = 196)

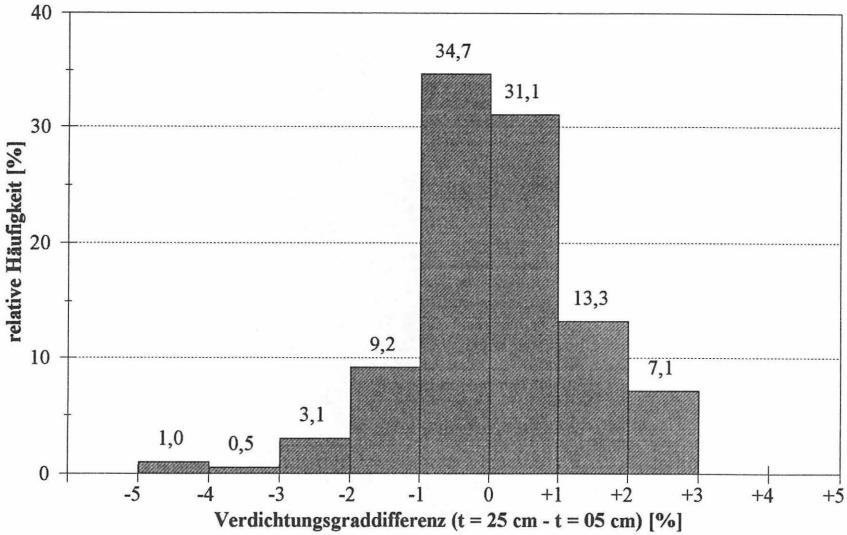


Bild 26: Häufigkeitsverteilung der Verdichtungsgraddifferenzen zwischen Strahlertiefe t = 25 cm und t = 05 cm (n = 196)

	Trockendichte ρ_d (t = 05 cm)	Trockendichte ρ_d (t = 25 cm)	Verdichtungsgraddifferenz D_{Pr} (t = 25 cm - t = 05 cm)
Mittelwert	1,790 t/m³	1,791 t/m³	0,001
Standardabweichung	0,021 t/m³	0,023 t/m³	0,012
Variationskoeffizient	0,011	0,013	-
Maximum	1,854 t/m³	1,851 t/m³	0,027
Minimum	1,735 t/m³	1,705 t/m³	- 0,049

Tabelle 21: Statistische Kenngrößen zur Bestimmung der Trockendichte - Aufbereitung in stationärer Anlage - (n = 196)

Zwar werden in diesem Fall die Anforderungen an die Trockendichte (bzw. Verdichtungsgrad) bei allen Messungen erfüllt, dennoch stellt sich die Frage, ob die Ursachen für die Fälle mit deutlich geringeren Verdichtungsgraden in größeren Meßtiefen lokalisiert werden können. Damit würde im Zweifelsfall die Möglichkeit bestehen, zusätzlich zur zerstörungsfreien Prüfung eine zerstörende Prüfung nach herkömmlichem Schema durchzuführen, um eine sichere Aussage zu erhalten.

Für die einzelnen Meßpunkte wird nachfolgend der Einfluß des Wassergehaltes auf die Dichtedifferenzen untersucht. Bild 27 zeigt für die Gruppe der Wassergehalte mit $w \leq 0{,}155$ den Zusammenhang zwischen den Trockendichten in beiden Meßtiefen. An etwa zwei Drittel der Meßpunkte tritt in größerer Meßtiefe eine geringere Trockendichte als bei oberflächennaher Messung auf. Davon betroffen sind alle Punkte mit ρ_d (t = 5 cm) $\leq 1{,}80$ t/m³ = ρ_{Pr}. Hier liegt auch mit $\rho_d = 1{,}705$ t/m³ die kleinste gemessene Trockendichte in der Strahlertiefe t = 25 cm. Die Ausgleichsgerade kann zwar aufgrund der Streuung der Meßergebnisse keinen eindeutig mathematischen Zusammenhang zwischen den Meßwerten beschreiben (Korrelationskoeffizient r = 0,66), jedoch lassen sich die Tendenzen gut erkennen.

Die für die anderen aus den Häufigkeitsuntersuchungen bekannten Wassergehaltsklassen analog durchgeführten Untersuchungen weisen die in Bild 28 dargestellte typische Erscheinungsform auf. Um die Dichtegleichheitsgerade konzentriert sich eine Wertewolke. Die Ausgleichsgerade (hier: Korrelationskoeffizient r = 0,50) besitzt eine Steigung < 1.

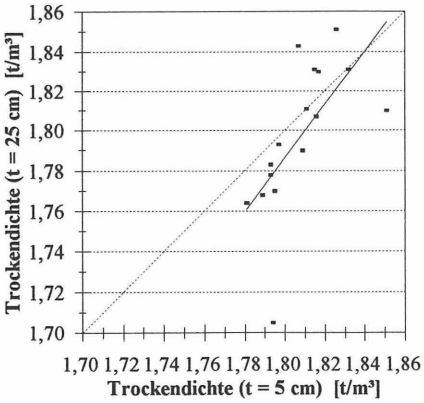


Bild 27: Vergleich der Trockendichten für $w \leq 0{,}155$

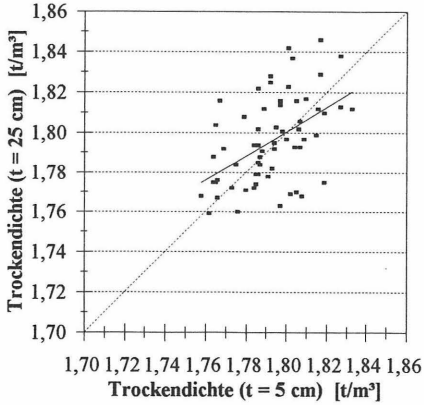


Bild 28: Vergleich der Trockendichten für $0{,}160 < w \leq 0{,}165$

In Bild 29 sind für die einzelnen Wassergehaltsklassen die Ausgleichsgeraden innerhalb der minimal und maximal aufgetretenen Trockendichten bei t = 5 cm eingetragen. Damit ist folgende Tendenz ersichtlich: Bei einem Wassergehalt w ≤ 0,155, der nach Bild 15 geringfügig über dem optimalen Wassergehalt liegt, ist gegenüber der Meßtiefe von 5 cm bei einer Messung von 25 cm Tiefe eine Abnahme der Trockendichte zu erwarten. Diese tritt umso stärker auf, je geringer die Trockendichte im oberflächennahen Bereich ist. Ist also nur eine zerstörungsfreie Prüfung durchgeführt worden, so wäre bei entsprechenden Ergebnissen abzuwägen, ob zusätzlich eine zerstörende Prüfung angebracht erscheint. Bei höheren Wassergehalten, w > 0,155, kehren sich die Verhältnisse nahezu um. In großer Meßtiefe sind sogar höhere Trockendichten als in kleiner Meßtiefe zu erwarten, solange ein bestimmter Dichtewert nicht überschritten wird. Wird er überschritten, sind die Verdichtungen in beiden Meßtiefen ohnehin wahrscheinlich ausreichend. Dadurch besteht bei einer zerstörungsfreien Prüfung im Hinblick auf die Abschätzung der Verhältnisse in größerer Tiefe eine positiv zu bewertende Sicherheit.

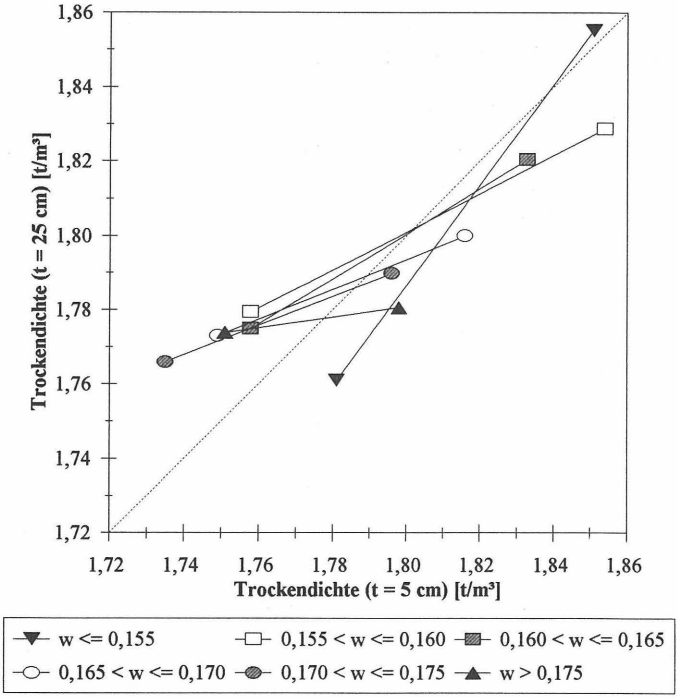


Bild 29: Vergleich der Ausgleichsgeraden für die Trockendichten in Abhängigkeit vom Wassergehalt

Neben dem aufgezeigten Einfluß des Wassergehaltes auf die Gleichmäßigkeit der Dichteverteilung innerhalb einer Lage können die Auswirkungen auf die jeweils mittlere Trockendichte und vor allem die Streubreite wie folgt quantifiziert werden: In Bild 30 sind für die einzelnen Wassergehaltsklassen die Mittelwerte und die Standardabweichungen der Trockendichten eingetragen und jeweils linear verbunden. Die mittlere Dichte nimmt mit zunehmendem Wassergehalt erwartungsgemäß ab. Auch bei den Standardabweichungen ist eine Abnahme zu beobachten. Bei Wassergehalten nahe dem optimalen Wassergehalt wird für t = 25 cm eine geringfügig kleinere Trockendichte als bei t = 5 cm festgestellt, die Standardabweichung ist jedoch deutlich größer und damit auch das Risiko von Fehlstellen. Mit zunehmenden Wassergehalt kommt es zu einer Angleichung der statistischen Kenngrößen. Im Bereich $\approx 0{,}16 < w < \approx 0{,}17$ sind die Werte quasi identisch. Bei noch höheren Wassergehalten treten sogar für t = 25 cm geringfügig bessere Werte auf (größere Mittelwerte und kleinere Abweichungen), deren Ursache auf den Verdichtungsprozeß zurückgeführt wird.

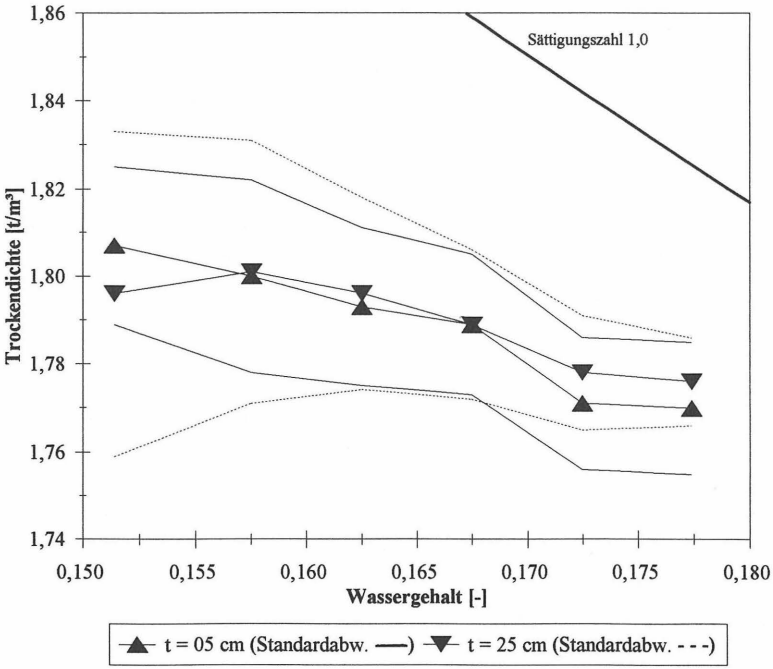


Bild 30: Mittelwert und Standardabweichung in Abhängigkeit vom Wassergehalt

5.5 Zusammenhang Dichtigkeit/Verdichtung

Entscheidend für die Qualität einer Dichtung ist die Dichtwirkung. Der grundsätzliche Zusammenhang zwischen Verdichtung und Dichtigkeit ist in Kap. 3 erläutert.

Neben dem optischen Eindruck liefert auch die Eintragung der Meßwerte im Trockendichte/Wassergehalts - Diagramm Informationen zur Abschätzung der Dichtwirkung. Die Bilder 31 und 32 zeigen für die Aufbereitungsvarianten im Feld und in der stationären Anlage sämtliche mit dem radiometrischen Meßverfahren ermittelten Wertepaare. Zusammengefaßt weist das stationäre Aufbereitungsverfahren im Hinblick auf die Dichtwirkung folgende Vorteile auf:

- optimale Wassergehaltssteuerung
- geringer Anteil von Meßwerten mit kleinerer Trockendichte
  (Beispiel $\rho_d < 1{,}75$ t/m³: stationär ≈ 2 %, Feld ≈ 20 %)
- gleichmäßige, weitestgehend tiefenunabhängige Verteilung der Trockendichten bei größeren Wassergehalten als $w \approx 0{,}16$.

Beide Diagramme zeigen, daß eine deutlich größere Streuung der Meßergebnisse vorliegt, wenn der Wassergehalt $w \approx 0{,}16$ unterschreitet. Bei größeren Wassergehalten ergibt die Feldaufbereitung tendenziell geringere Trockendichten in größerer Meßtiefe.

Zur Quantifizierung der Dichtungsqualität werden die mit dem Ausstechzylinderverfahren entnommenen Proben in eine Triaxialzelle eingebaut, bei einem hydraulischen Gefälle von $i = 30$ durchströmt und der Durchlässigkeitsbeiwert bestimmt. Da die Proben anforderungsgerecht aus dem unteren (kritischen) Teil einer hergestellten Lage stammen, sind aufgrund der beschriebenen Ergebnisse bei stationärer Aufbereitung günstigere Durchlässigkeitsbeiwerte und folglich eine bessere Dichtungsqualität zu erwarten.

Die Bilder 33 und 34 zeigen Häufigkeitsverteilungen der Durchlässigkeitsbeiwerte (k-Werte). Die Zahlenwerte sind in 4 Klassen zusammengefaßt und als relative Häufigkeit bezogen auf die Anzahl der Gesamtprüfungen aufgetragen. Als Klassengrenzen sind bedeutsame Eckwerte gewählt, $k = 1 \cdot 10^{-9}$ m/s als Grenzwert für den Einbau des im Feld aufbereiteten Dichtungsmaterials, $k = 5 \cdot 10^{-10}$ m/s als Regelgrenzwert (s. Kap. 2) und als Grenzwert für den Einbau des in der stationären Anlage aufbereiteten Dichtungsmaterials und $k = 1 \cdot 10^{-10}$ m/s als Anforderung nach NRW-Richtlinie [5]. Die statistischen Kenngrößen enthält Tabelle 22. An dieser Stelle sei ausdrücklich darauf hingewiesen, daß es nicht möglich ist, den Einfluß unterschiedlichen Bentonitanteils (Feldaufbereitung 3 %, stationäre Aufbereitung 5 %) auf die Durchlässigkeitsbeiwerte zu quantifizieren.

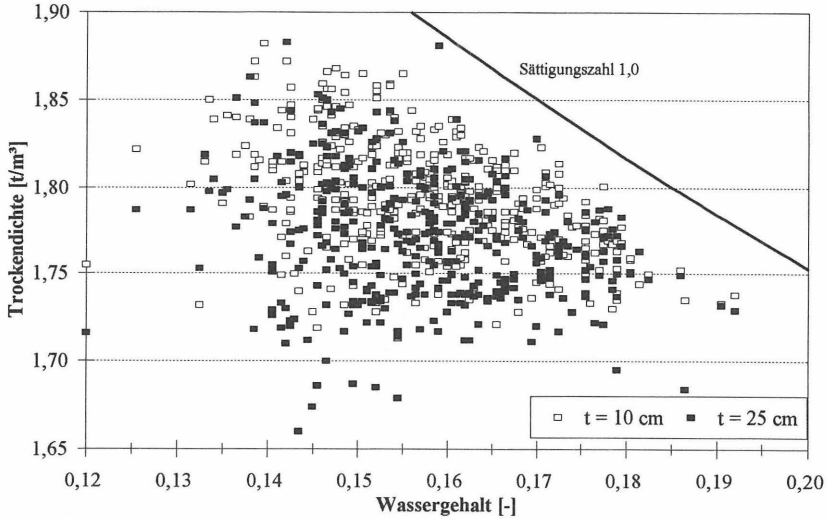


Bild 31: Radiometrische Messungen von Trockendichte und Wassergehalt
- Aufbereitung im Feld - (n = 780)

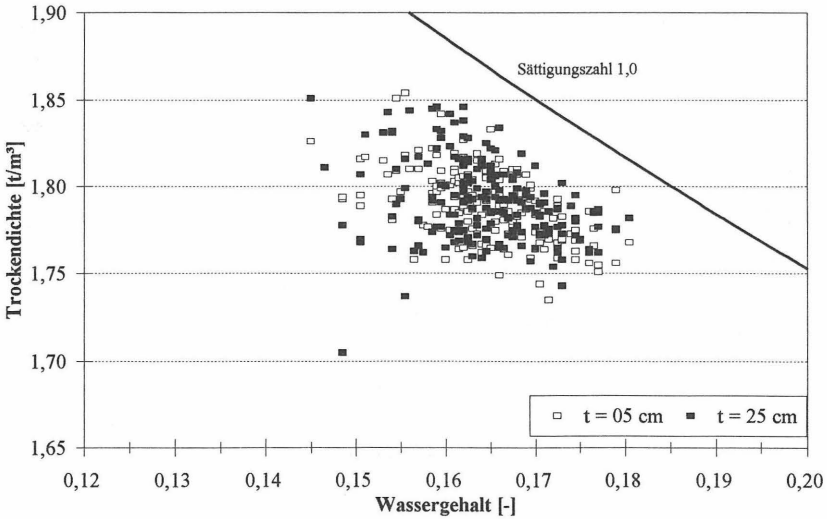


Bild 32: Radiometrische Messungen von Trockendichte und Wassergehalt
- Aufbereitung in stationärer Anlage - (n = 392)

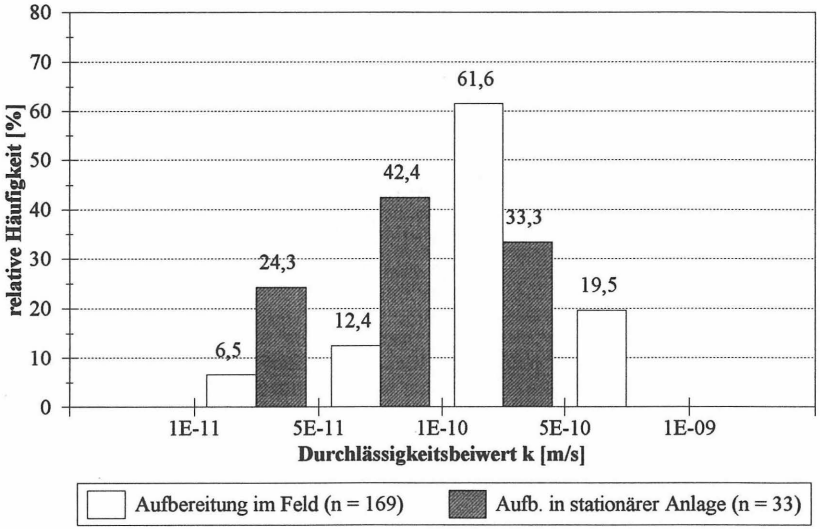


Bild 33: Häufigkeitsverteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte - alle Proben -

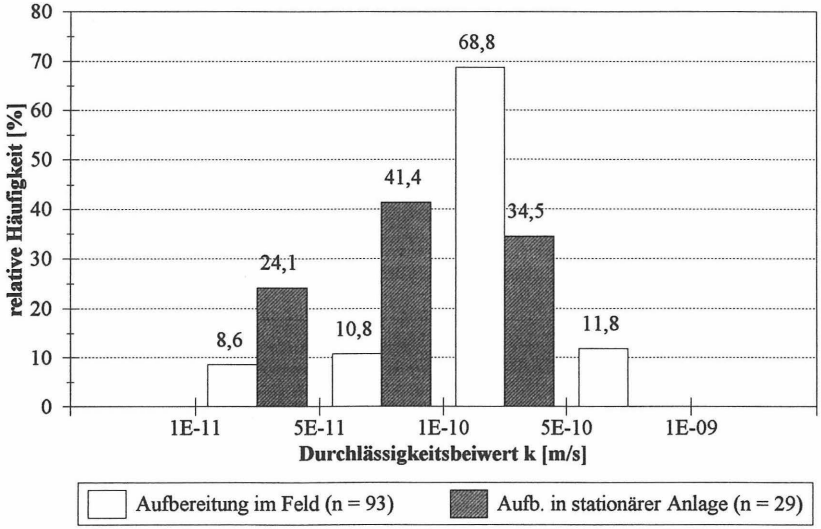


Bild 34: Häufigkeitsverteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte - Proben mit $0{,}155 \leq w \leq 0{,}175$ -

Aufbereitung: Feld	Probenauswahl	gesamt	$0{,}155 \leq w \leq 0{,}175$	$0{,}155 \leq w \leq 0{,}175$ und $\rho_d \geq 1{,}75$ t/m³
	Anzahl [-]	169	93	81
	Mittelwert [m/s]	$3{,}1 \cdot 10^{-10}$	$2{,}6 \cdot 10^{-10}$	$2{,}5 \cdot 10^{-10}$
	Standardabw. [m/s]	$2{,}5 \cdot 10^{-10}$	$2{,}1 \cdot 10^{-10}$	$2{,}0 \cdot 10^{-10}$
Aufbereitung: stat. Anlage	Probenauswahl	gesamt	$0{,}155 \leq w \leq 0{,}175$	$0{,}155 \leq w \leq 0{,}175$ und $\rho_d \geq 1{,}75$ t/m³
	Anzahl [-]	33	29	29
	Mittelwert [m/s]	$1{,}1 \cdot 10^{-10}$	$1{,}1 \cdot 10^{-10}$	$1{,}1 \cdot 10^{-10}$
	Standardabw. [m/s]	$7{,}1 \cdot 10^{-11}$	$7{,}0 \cdot 10^{-11}$	$7{,}0 \cdot 10^{-11}$

Tabelle 22: Mittelwert und Standardabweichung der Durchlässigkeitsbeiwerte

Die Ergebnisse aller Prüfungen sind in Bild 33 gegenübergestellt. Die bereits aufgrund der Wassergehalts- und Dichteverteilungen erwartete Verbesserung der Durchlässigkeitsbeiwerte durch den Einsatz der stationären Aufbereitungsanlage ist offensichtlich. Der Mittelwert wird durch diese Maßnahme von $k = 3{,}1 \cdot 10^{-10}$ m/s auf $k = 1{,}1 \cdot 10^{-10}$ m/s, also etwa um den Faktor 2,8, herabgesetzt. Die Reduzierung der Standardabweichung von $s_k = 2{,}5 \cdot 10^{-10}$ m/s auf $s_k = 7{,}1 \cdot 10^{-11}$ m/s, Faktor 3,5, spricht für eine signifikante Homogenitätszunahme.

Da aber, wie gezeigt, der Wassergehalt einen entscheidenden Einfluß auf die Gleichmäßigkeit der Dichteverteilung ausübt, sollten für den direkten Verfahrensvergleich Proben mit zumindest annähernd gleichen Wassergehalten verglichen werden. Dafür bietet sich der bei der neuen Baumaßnahme angestrebte Wassergehaltsbereich von $0{,}155 \leq w \leq 0{,}175$ an.

Bild 34 zeigt die zugehörige Häufigkeitsverteilung. Nur in den beiden oberen Klassen tritt bei der Aufbereitung im Feld eine erwähnenswerte Veränderung auf. Durch den Wegfall der Proben mit $w < 0{,}155$ kommt es zu einer leichten Verschiebung zu besseren Durchlässigkeitsbeiwerten. Insgesamt bleibt das Bild jedoch im wesentlichen unverändert. Bei der Materialaufbereitung in der stationären Anlage ist der Mittelwert der Durchlässigkeitsbeiwerte um den Faktor 2,4 und die Standardabweichung um den Faktor 3,0 günstiger als bei der Feldaufbereitung.

Eine weitere Einschränkung der Betrachtungsweise durch Festlegung einer Mindesttrockendichte (hier gewählt: $\rho_d \geq 1{,}75$ t/m³), damit sichergestellt wird, daß bei der Aufbereitung im Feld nicht durch wenige Proben mit geringer Trockendichte und daher wahrscheinlich höheren Durchlässigkeitsbeiwerten ein entscheidender Einfluß ausgeübt wird, zeigt keine nennenswerte Veränderung der statistischen Kenngrößen. Damit wird eindeutig der signifikante Unterschied beider Verfahrensweisen bestätigt.

5.6 Bewertung des Prüfverfahrens

Bei der Bewertung der Einsetzbarkeit der radiometrischen Meßverfahren muß nach dem Beurteilungskriterium, Wassergehalt oder Trockendichte, unterschieden werden. Die Aussagen gelten für die im Praxisbeispiel vorliegenden Randbedingungen. Eine Übertragbarkeit auf andere Verhältnisse, insbesondere bei Einsatz anderer Dichtungmaterialien, ist im Einzelfall zu prüfen. Die ordnungsgemäße Zustand des Prüfgerätes und die fachgerechte Bedienung inklusive der Abstimmung mit herkömmlichen Verfahren werden vorausgesetzt.

Wassergehalt:

Das radiometrische Meßverfahren arbeitet grundsätzlich zerstörungsfrei. Es ist hervorragend zur Wassergehaltsbestimmung einer eingebauten mineralischen Dichtung geeignet, das gilt auch für die Prüfung vor der Verdichtung. In Anbetracht der kurzen Zeitdauer von nur wenigen Minuten für die Meßpunkteinrichtung und die eigentliche Durchführung der Messung kann problemlos das Meßpunktraster beliebig verdichtet werden.

Trockendichte:

Das radiometrische Meßverfahren arbeitet nur im Aufsetzbetrieb zerstörungsfrei. Die Meßgenauigkeit wird jedoch durch die Einstichtiefe des Strahlers von 5 cm erhöht. Da der gesamte oberflächennahe Bereich oftmals angefräst wird oder sich andernfalls das relativ kleine Prüfloch schnell und sicher verstopfen läßt, kann auch hier der Betrieb als zerstörungsfrei bezeichnet werden. Ein nennenswerter Zeitverlust entsteht nicht.

Die Sicherheit, mit der von dem Ergebnis einer oberflächennahen Messung auf den Zustand im unteren Teil der eingebauten Lage geschlossen werden kann, ist unmittelbar an das Vorhandensein einer möglichst guten Dichtegleichheit über die gesamte Lagendicke gekoppelt. Diese ohnehin wünschenswerte Eigenschaft ist durch die Materialaufbereitung beeinflußbar.

Das vorliegende Beispiel zeigt, daß durch die Materialaufbereitung in der stationären Anlage gegenüber der Feldaufbereitung eine hervorragende Dichtekonstanz erzeugt wird und zudem

insgesamt ein höheres Dichteniveau erreicht wird. An keinem der 196 Meßpunkte wäre eine zerstörende Prüfung, also in größerer Tiefe, erforderlich gewesen. Alle Meßwerte erfüllen die an sie gestellten Anforderungen.

Dichteabweichungen über die Lagendicke werden zudem vom Wassergehalt beeinflußt. Bei relativ geringen Wassergehalten, also in unmittelbarer Nähe des Proctorwassergehaltes oder geringfügig höher, ist besonders bei bereits geringer oberflächennaher Trockendichte eine unzulässige Abweichung in größerer Tiefe möglich. In diesen Fällen empfiehlt sich die zerstörende Messung zusätzlich durchzuführen.

Statt der vollständigen Lochausschachtung kann, je nach Materialeigenschaft, das Loch in mehreren Lagen verfüllt werden. Beispielhaft wurde in 30 cm hohe Proben, d = 25 cm, der Einstichstab bis auf eine Tiefe von 25 cm eingetrieben und nach Herausziehen des Stabes und lagenweiser Wiederverfüllung und -verdichtung des Loches Proben mit dem Ausstechzylinderverfahren aus dem unteren Bereich entnommen. Bild 35 zeigt für konstante Einbaueigenschaften (Wassergehalt $w \approx 0{,}163$; Trockendichte $\rho_d \approx 1{,}82$ t/m³) die Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes von der Anzahl der Lagen zur Lochverstopfung. Bei einer mindestens zweilagigen Verstopfung werden Werte in der Größenordnung eines nicht zerstörten Bodenkörpers ermittelt. Bei Nachweis des Erfolges dieser Vorgehensweise in situ ist gegenüber der zerstörungsfreien Prüfung ein etwa dreifacher Zeitaufwand pro Meßpunkt zu kalkulieren.

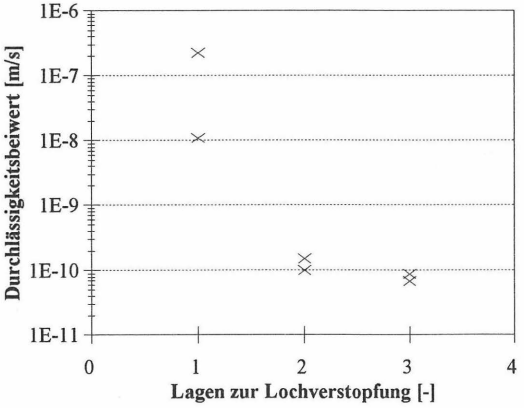


Bild 35:
Einfluß der Lochverstopfung auf den Durchlässigkeitsbeiwert

6. MESSUNGEN MIT DEM DYNAMISCHEN PLATTENDRUCKVERSUCH

6.1 Allgemeines

Der dynamische Plattendruckversuch mit Hilfe des Leichten Fallgewichtsgerätes ist grundsätzlich als Kontrollprüfung für die Einbauqualität eines nichtbindigen Bodenmaterials geeignet (Kap. 4.5). Dennoch wird der bestehende, umfangreiche Erfahrungsschatz nicht zuletzt auf Grund der neuen Festlegungen in der TP BF-StB, Teil B 8.3 [12] durch Vergleichsuntersuchungen ständig erweitert. In diesem Teil der Arbeit wird untersucht, inwieweit das Meßverfahren als Qualitätsprüfverfahren im mineralischen Dichtungsbau sinnvoll einsetzbar ist.

Bei der Erweiterung einer Hausmülldeponie ist das Prüfverfahren abschnittsweise zum Qualitätsnachweis für die ordnungsgemäße Verdichtung des Planums als Basis der künstlichen mineralischen Barriere erprobt worden. Die Versuchsausführung und die Auswertung der Meßdaten werden kurz geschildert (Kap. 6.2).

Im Zusammenhang mit der Prüfung gemischt- oder feinkörniger Dichtungsmaterialien liegen bisher kaum Ergebnisse vor. Eine vergleichbare Situation besteht beim Eignungsnachweis für walzenintegrierte Meßsysteme (Kap. 3.3). Die Ursache hängt unmittelbar mit dem Einfluß des Wassergehaltes zusammen, der einen bestimmten Grenzwert (i.d.R. den optimalen Wassergehalt) nicht unterschreiten darf, um die gewünschte Dichtwirkung zu gewährleisten.

Im Labor ist ein Versuchsstand eingerichtet worden, mit dem bei reproduzierbaren, idealen Bedingungen der grundsätzliche Zusammenhang zwischen der Einbauqualität und den Meßergebnissen bei Einsatz des dynamischen Plattendruckversuches untersucht wird. Aufgrund der Vielzahl von Einflußfaktoren können die Untersuchungen keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, so daß exemplarisch für ein ausgewähltes Dichtungsmaterial der Einfluß der wesentlichen Einbauparameter, Dichte und Wassergehalt, aufgezeigt wird und weitere Einflüsse, z.B. oberflächennahe Antrocknungen, nur stichprobenartig analysiert und qualitativ abgeschätzt werden (Kap. 6.3).

Abschließend werden die Ergebnisse verschiedener Felduntersuchungen vorgestellt (Kap. 6.4) und der praktische Einsatz des Prüfverfahrens insgesamt bewertet (Kap. 6.5).

6.2 Prüfung eines nichtbindigen Deponieauflagers

6.2.1 Untergrundmaterial

Die Korngrößenverteilungen des Untergrundmaterials im untersuchten Planumsabschnitt einer Hausmülldeponieerweiterung sind in ihrer ermittelten Streubreite in Bild 36 dargestellt.

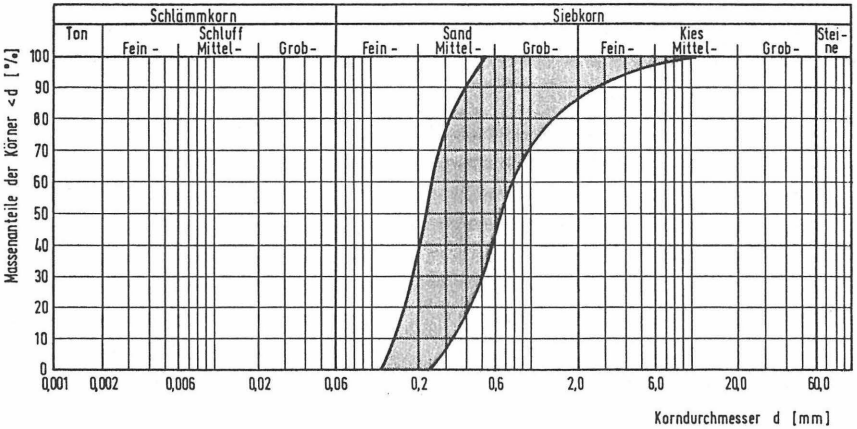


Bild 36: Streubreite der Korngrößenverteilung des Untergrundmaterials

Das Bodenmaterial setzt sich im wesentlichen aus Fein-, Mittel- und Grobsand zusammen und ist entsprechend der Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke nach DIN 18196 als enggestufter Sand SE einzuordnen.

Die im selben Labor durch verschiedene Laboranten durchgeführten Proctorversuche ergeben eine mittlere Proctordichte von $\rho_{Pr,m}$ = 1,797 t/m³. Die Größe der Standardabweichung von σ ($\rho_{Pr,m}$) = 0,024 t/m³ ist im wesentlichen auf die Streubreite der Korngrößenverteilungen zurückzuführen. Eine eindeutige Bestimmung des optimalen Wassergehaltes ist nicht immer möglich (vgl. DIN 18127).

6.2.2 Versuchsausführung

Die Ausführung der Feldversuche mit dem dynamischen Plattendruckversuch richtet sich nach den Vorgaben in der TP BF-StB, Teil B 8.3 [12].

Das Kernproblem besteht in der zu Vergleichszwecken und damit zur Beurteilung der Einsetzbarkeit des Verfahrens erforderlichen Bestimmung der wirklichen Ist-Eigenschaften des Unter-

grundes am Prüfort. Mögliche Methoden sind das Ausstechzylinder- und die Ersatzverfahren nach DIN 18125, T2. Statische Plattendruckversuche nach DIN 18134 bleiben an dieser Stelle unberücksichtigt, weil sie aufgrund des hohen Zeitbedarfs in Anbetracht der Prüfungsdichte (Kap. 2) dem gewünschten zügigen Bauablauf entgegensprechen und auch bei der Prüfung der Einsetzbarkeit des dynamischen Plattendruckversuches bei mineralischen Dichtungen keine Verwendung finden können (Kap. 4).

Im Rahmen der Vergleichsuntersuchungen mit dem Leichten Fallgewichtsgerät schlägt die FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (1993) vor, in der Achse einer Verdichtungsspur zuerst die Dichtebestimmung mittig zwischen den folgenden (i.d.R. 4, bei seitlich begrenzten Prüfebenen 2) dynamischen Plattendruckversuchen durchzuführen. Bei Verwendung von Ausstechzylindern, 2 Stück pro Prüfstelle, liegt die Ansatzhöhe 5 cm unterhalb der Versuchsebene der dynamischen Plattendruckversuche. Der lichte Abstand Ausstechzylinder - Plattendruckversuch beträgt 30 - 40 cm.

Bei den hier durchgeführten Untersuchungen ist unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Problematik der Zuordnung Meßstelle → Bezugsfläche (Kap. 3.3.2) und diesbezüglich vorher in situ durchgeführter Dichtebestimmungen, die z.T. nicht unerhebliche Schwankungen bei Messungen im Halbmeterabstand aufwiesen, einer anderen Vorgehensweise der Vorzug gegeben worden:

Nach der Durchführung des dynamischen Plattendruckversuches werden an der Prüfstelle in einem Abstand von 5 cm unter dem Auflagepunkt der Lastplatte zwei Ausstechzylinder (Tiefe 05 - 17 cm; seitlicher Abstand 10 cm) und in einer darunterliegenden zweiten Ebene nochmals zwei Ausstechzylinder (Tiefe 19 - 31 cm; seitlicher Abstand 10 cm) entnommen (s. Bild 37).

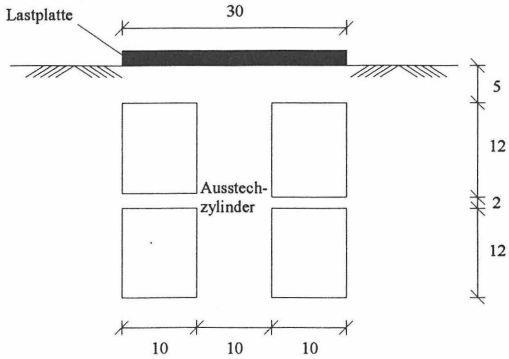


Bild 37: Meßanordnung pro Prüfstelle

Bei hoher Verdichtung und dementsprechend steifem Untergrund stellen sich durch den Impuls des Fallgewichtes nur minimale plastische Verformungen im oberflächennahen Bereich ein. Liegt eine geringere Verdichtung vor, so wird durch den Prüfvorgang eine Nachverdichtung erzeugt und die mit Vergleichsmessungen direkt an der Oberfläche ermittelten Meßwerte entsprechen nicht den wirklichen Gegebenheiten vor Prüfungsbeginn. Bei der hier gewählten Meßanordnung wird davon ausgegangen, daß durch den Impuls des Fallgewichtes keine signifikante Beeinflussung des Meßvolumens eintritt.

6.2.3 Auswertung der Meßdaten

Insgesamt liegen Ergebnisse von 16 mittig (nicht im Überlappungsbereich) auf nebeneinander liegenden Verdichtungsspuren angeordneten Prüfstellen vor. Aufgrund des gleichmäßigen Wassergehaltes ist eine Differenzierung nicht erforderlich.

Bild 38 zeigt den Zusammenhang von Trockendichte und dynamischem Verformungsmodul. Dabei ist dem pro Prüfstelle ermittelten Verformungsmodul die mittlere Trockendichte aus jeweils beiden Ausstechzylindermeßebenen, 05 - 17 cm und 19 - 31 cm, und die sich über die gesamte Tiefe (05 - 31 cm) ergebende mittlere Trockendichte gegenübergestellt.

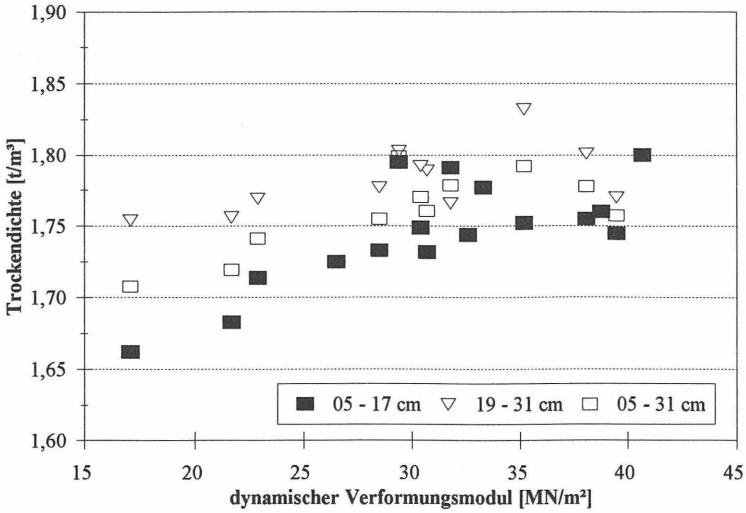


Bild 38: Zusammenhang Trockendichte/dynamischer Verformungsmodul

Die Betrachtung der oberen Vergleichsebene zeigt den erwarteten Zusammenhang zwischen den Kennwerten. Bei geringerem Verformungsmodul ist auch eine geringere Trockendichte zu registrieren. Zur Einhaltung der Anforderungen an den Verdichtungsgrad von im Regelfall $D_{Pr} \geq 0{,}95$ (Kap. 2), das entspricht bei einer angesetzten Proctordichte von $\rho_{Pr} = 1{,}80$ t/m³ einer Trockendichte von $\rho_d = 1{,}71$ t/m³, könnte demnach ein Mindestverformungsmodul von z.B. $E_{vd} = 25$ MN/m² festgesetzt werden. Höhere Verformungsmoduln sprechen für eine Einhaltung der Anforderung, geringere erfordern Nacharbeiten. In diesem Fall konnten drei Verdichtungsspuren, die zuvor planmäßig schlechter verdichtet waren, sicher ausfindig gemacht werden.

Der angesetzte Verformungsmodul liegt etwa in der Größenordnung der in Tabelle 11 angegebenen Zuordnungswerte.

Die zusätzlichen Vergleichsangaben für größere Tiefenbereiche spiegeln den Einfluß der Tiefenwirkung des Plattendruckversuches wider. Die für den oberflächennahen Bereich beschriebene Tendenz zeigt sich ebenfalls, wenn auch schon in leicht abgeschwächter Form, für die Gesamtwerte von 05 - 31 cm Tiefe unter dem Lastplattenansatzpunkt. Die ausschließliche Betrachtung der unteren Vergleichsebene (19 - 31 cm) läßt keinen Zusammenhang erkennen.

Zusatzversuche mit dem Ausstechzylinderverfahren in den einzelnen Verdichtungsspuren haben die Ergebnisse bestätigt. Durch die Vergleichsmessung in 05 - 17 cm Tiefe ist ein für die Größe des Verformungsmoduls repräsentativer Bereich erfaßt worden.

6.2.4 Fazit

Die in Kap. 4.5 beschriebenen positiven Erfahrungen mit dem Einsatz des dynamischen Plattendruckversuches bei nichtbindigen Untergrundmaterialien können natürlich grundsätzlich auf entsprechende Deponieauflagerbedingungen übertragen werden. Besonders bei homogenen Untergrundverhältnissen ist die zerstörungsfreie, schnelle und damit deutlich flächendeckendere Prüfmethode durchaus zur Qualitätsprüfung geeignet.

Die Festlegung von erforderlichen Grenzwerten und Untersuchungshäufigkeiten sollte in jedem Fall den jeweiligen spezifischen örtlichen Randbedingungen angepaßt werden. Dazu sind Vergleichsuntersuchungen mit herkömmlichen Verfahren, z.B. bei der ohnehin erforderlichen Anlage von Versuchsfeldern, unerläßlich.

6.3 Laborversuche an gemischtkörnigem Bodenmaterial unter idealen Bedingungen

6.3.1 Ziele und Vorgaben

Die Ziele der Laborversuche mit dem dynamischen Plattendruckgerät sind:

- Feststellung des Reaktionsverhaltens eines mineralischen Dichtungsmaterials bei dynamischer Beanspruchung durch Plattendruckversuche in Abhängigkeit vom Einbauzustand (Wassergehalt, Dichte)
- Nachweis der grundsätzlichen Funktionstüchtigkeit des Verfahrens und Aufzeigen der Anwendbarkeitsgrenzen
- Bewertung der Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf die Verhältnisse in situ und Nachweis im nächsten Arbeitsschritt (s. Kap. 6.4).

Die Vorgabe für eine erfolgversprechende Versuchsdurchführung besteht in der Schaffung reproduzierbarer idealer Bedingungen. Dazu sind die Wahl des mineralischen Dichtungsmaterials und des Versuchsaufbaus von grundlegender Bedeutung:

- Mineralisches Dichtungsmaterial

  Das mineralische Dichtungsmaterial muß optimal homogen und sollte für die Produktion der einzelnen Prüfkörper möglichst leicht verarbeitbar sein, um materialbedingte Unzuverlässigkeiten in den Versuchsergebnissen zu minimieren. Unter Berücksichtigung positiver Erfahrungen bei der Prüfung grobkörnigen Materials mit dynamischen Plattendruckgeräten (s. Kap. 4.5) empfiehlt sich daher der Einsatz eines gemischtkörnigen Bodenmaterials. Die grundsätzliche Eignung und der praktische Einsatz als Dichtungsmaterial sind zu gewährleisten.

- Versuchsaufbau

  Durch die Gerätewahl und das Bodeneinbauverfahren muß einerseits eine optimale Dichtekonstanz im Prüfkörper und andererseits die weitestgehende Ausschaltung ungewünschter Einflußfaktoren auf den Einbau und die anschließende Plattendruckprüfung garantiert werden, um herstellungsbedingte Unzuverlässigkeiten in den Versuchsergebnissen zu minimieren. Die Prüfkörperabmessungen sind so abzustimmen, daß für die Plattendruckprüfung ein ausreichend großer Resonanzkörper vorhanden ist. Eine unnütze Übergröße steigert den Aufwand und birgt das Risiko zusätzlicher Ungenauigkeiten.

6.3.2 Mineralisches Dichtungsmaterial

6.3.2.1 Vorbemerkung

Das mineralische Dichtungsmaterial wurde im Rahmen der Erweiterung einer Hausmülldeponie in Niedersachsen als 3 m dicke künstliche mineralische Barriere auf einer Grundfläche von ca. 22.000 m² eingebaut.

Das Bodenmaterial für die Laborversuche (Prüfboden) stammt aus einem kleinen Teilvolumen der Abbaugrube und steht in einer für alle Versuche ausreichenden Menge zur Verfügung.

6.3.2.2 Klassifikation

Die Korngrößen des Prüfbodens gehören zu etwa 28 % Massenanteil dem Feinkornbereich ≤ 0,06 mm Korndurchmesser (16 % Ton, 12 % Schluff) und 72 % Massenanteil dem Grobkornbereich > 0,06 mm Korndurchmesser (56 % Feinsand, 16 % Mittelsand) an, s. Körnungslinie Bild 39.

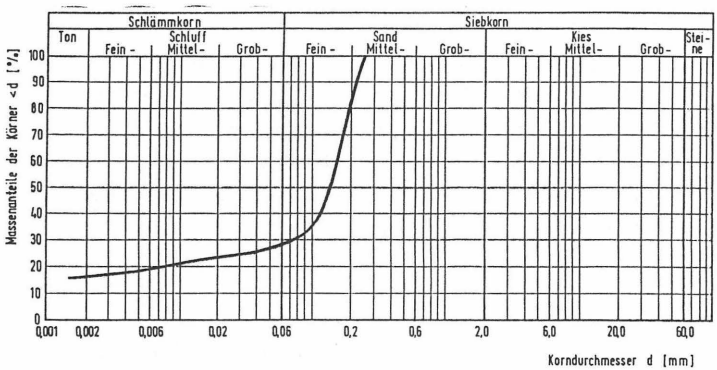


Bild 39: Körnungslinie des Prüfbodens

Mit der Fließgrenze w_L = 0,250 und der Plastizitätszahl I_P = 0,116 ist das Bodenmaterial entsprechend der Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke nach DIN 18196 als Sand-Ton-Gemisch ST* einzuordnen, s. Plastizitätsdiagramm Bild 40.

Weitere Bodenkennwerte:	Glühverlust	V_{gl} = 0,011
	Kalkgehalt	V_{Ca} = 0,024
	Korndichte	ρ_s = 2,682 g/cm³
	Wasseraufnahmevermögen (nach Enslin/Neff)	w_b = 0,445.

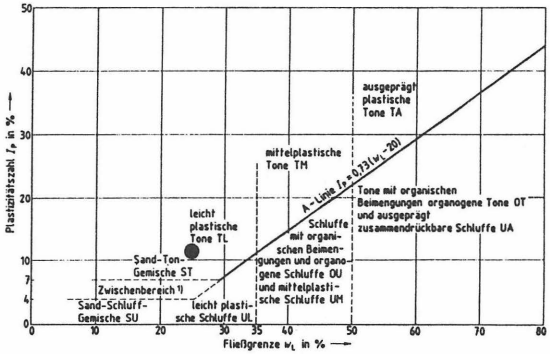


Bild 40:
Plastizitätsdiagramm zum Prüfboden

6.3.2.3 Verdichtungseigenschaften

Die Verdichtung des Prüfbodens nach Prüfung DIN 18127 - P 100 X ergibt folgende Kennwerte, s. Proctorkurve Bild 41:

- Optimum : ρ_{Pr} = 1,79 t/m³ bei w_{Pr} = 0,148
- D_{Pr} = 0,95 (nasse Seite): $\rho_{0,95Pr}$ = 1,70 t/m³ bei $w_{0,95Pr}$ = 0,185.

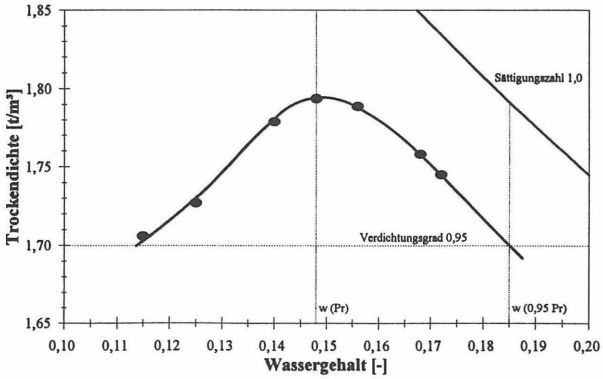


Bild 41: Proctorkurve des Prüfbodens

6.3.2.4 Durchlässigkeit

An 60 während der Baumaßnahme mit dem Ausstechzylinder-Verfahren (Prüfung DIN 18125 - F 62) entnommenen Proben ist die Wasserdurchlässigkeit im Triaxialgerät geprüft worden. Die bei einem hydraulischen Gefälle von i = 30 ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte erfüllen bei einem Mittelwert von etwa $k_m = 6 \cdot 10^{-9}$ m/s die Anforderung von $k \leq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s.

6.3.3 Produktion und Nachweis idealer Prüfkörper

6.3.3.1 Vorbemerkung

An die Produktion der Prüfkörper aus mineralischem Dichtungsmaterial sind im Hinblick auf die anschließende Prüfung mit dem dynamischen Plattendruckgerät folgende Ziele gerichtet:

- optimale Materialaufbereitung mit definiertem Wassergehalt
- optimale Dichtekonstanz im verdichteten Prüfkörper.

Die optimale Materialaufbereitung, d.h. die Homogenisierung des Gesamtmaterials sowie die Einstellung des Wassergehaltes für die Teilversuche, bereitet aufgrund der Bodeneigenschaften keine besondere Schwierigkeit.

In Anbetracht der erforderlichen Prüfkörpergröße liegt das eigentliche Kernproblem in der aufwendigen Erzeugung der optimalen Dichtekonstanz.

Die Höhe des verdichteten Bodenkörpers wird zu h = 30 cm festgelegt, da gem. TP BF - StB, Teil B 8.3 [12] der Hauptanteil der gemessenen Setzungen aus Tiefen bis zum 1-fachen Durchmesser der Lastplatte (d = 30 cm) resultiert und die Ergebnisse eigener Untersuchungen diese Angabe bestätigen (s. Kap. 6.3.4.3). Damit ist eine gute Anpassung an die Regeldicke einer in situ einzubauenden Dichtungslage von 25 cm (s. Kap. 2) gewährleistet. Der Durchmesser des Bodenkörpers ist so zu wählen, daß die für den Laborversuch benötigte seitliche Umrandung keinen oder nur einen gleichbleibenden vernachlässigbaren Einfluß auf die Meßergebnisse ausübt. Die Prüfkörper sind zur Vermeidung von Einflüssen aus Vorversuchen nur zum einmaligen Gebrauch bestimmt, folglich ist für jede Untersuchung mit dem dynamischen Plattendruckgerät ein Prüfkörper herzustellen.

Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen haben Vorversuche zur Herstellung dichtekonstanter Prüfkörper dieses Bodenmaterials gezeigt, daß bei Einbau in dünnen Lagen und anschließender schlagender Verdichtung, also einer an den Proctorversuch angelehnten Vorgehensweise, gute Ergebnisse erzielt werden. Der mögliche Einfluß der grundsätzlich voneinander abweichenden Verdichtungsprinzipien im Feld (Vibrationstechnik) und im Labor (Fallgewichte) kann im Labormaßstab nicht mit vertretbarem Aufwand analysiert werden.

Im Gegensatz zum Proctorversuch sind bei den Untersuchungen nicht nur die zu einem bestimmten Wassergehalt aufgrund der definierten Verdichtungsarbeit zugehörigen Dichten, sondern im wesentlichen Einbauzustände mit geringeren Dichten zu erzeugen, um das Reaktionsverhalten des Bodens bei dynamischer Beanspruchung durch Plattendruckversuche in seiner möglichen Vielfalt vollständig zu erfassen.

6.3.3.2 Bodeneinbau in Prüftöpfen d = 100 cm und d = 45 cm

Als Prüftöpfe dienen auf dem Gebäudefundament fest positionierte Schachtringe aus Beton mit den Abmessungen (s.a. Bild 42):

- Innendurchmesser d	100 cm	bzw.	45 cm
- Höhe h	50 cm	bzw.	30 cm
- Wanddicke s	9 cm	bzw.	5 cm.

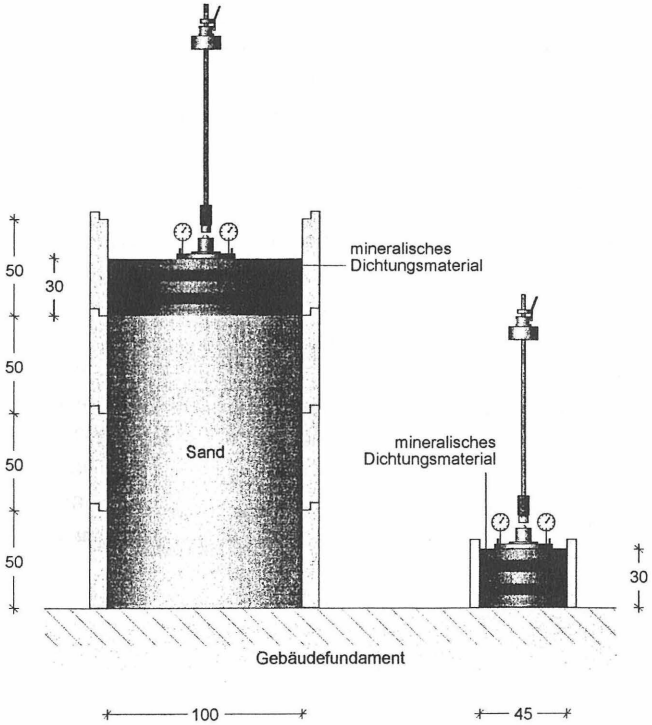


Bild 42: Prüftöpfe d = 100 cm bzw. d = 45 cm

Die ersten Prüfkörper wurden im Prüftopf d = 100 cm hergestellt. Dazu sind jeweils ca. 500 kg Bodenmaterial aufzubereiten und entsprechend der gewünschten Dichte und des bekannten Einbauvolumens einer Lage möglichst gleichmäßig über den Querschnitt verteilt in den Ring einzufüllen. Die Verdichtung der insgesamt 5 Lagen zu je 6 cm Dicke resultiert aus der Schlagwirkung eines 15 kg - Fallgewichtes gem. DIN 18127, Ausführung C auf eine lastverteilende Stahlplatte (d = 30 cm). Die Verlegung einer dünnen Baufolie auf dem Sand und an

der Wandung des oberen Ringes hilft Kleb- bzw. Vermischungseffekte zwischen Prüfboden und Sand zu vermeiden und begünstigt den Materialausbau nach Versuchsende. Zur Lagendickenkontrolle werden sowohl Nivellier- als auch Gliedermaßstabsmessungen, 18 Meßpunkte auf 4 Diagonalen, durchgeführt. Der Gesamtherstellungsaufwand bis zur eigentlichen Prüfreife mit dem dynamischen Plattendruckgerät beträgt bei 3 Laboranten je 4 Arbeitsstunden.

Die wesentlichen Nachteile sind in den Einbau- und Verdichtungsvorgängen begründet. Durch die in bezug auf den Innendurchmesser kleine Stahlplatte zur Verteilung der Verdichtungsschläge und der folglich großen Anzahl an Ansatzpunkten und Umlaufvorgängen (vgl. Proctorversuch) sind die Bedingungen im Hinblick auf eine hochwertige Dichtekonstanz, wenn auch nicht quantifizierbar, und eine möglichst ebene Lagenoberfläche nicht optimal. Hier kann eine modifizierte Versuchseinrichtung mit einer annähernd durchmessergroßen, biegesteifen Lastplatte, die bei der Größe des Prüftopfes und der aufzubringenden Verdichtungsenergie über Preßvorrichtungen in den Bodenkörper gedrückt werden müßte, Abhilfe schaffen.

Für die Abschätzung der Funktionstüchtigkeit des Plattendruckgerätes im Labormaßstab genügt an dieser Stelle vereinfachend der Einsatz eines verkleinerten Prüftopfes d = 45 cm, der hinsichtlich der Einbau- und Verdichtungsvorgänge alle Vorteile bietet. Die Masse einzubringenden Bodenmaterials wird auf ca. 100 kg reduziert. Die nicht mehr umzusetzende lastverteilende Platte weist einen Durchmesser von ca. d = 43 cm auf. Eine ebene Lagenoberfläche ist garantiert, die Dickenkontrolle reduziert sich auf 4 Meßpunkte. Der Einfluß des Bodenuntergrundes wird durch die direkte Auflagerung auf dem Gebäudefundament eliminiert, Boden-Wand-Effekte vernachlässigt. Trotz des nicht unerheblichen Einflusses bereits geringer Dickenabweichungen, Bild 43 zeigt für einen Soll-Verdichtungsgrad von D_{Pr} = 0,95 die Auswirkung der Nichteinhaltung der Gesamtsolldicke von h = 30 cm, können bei präziser Arbeit hervorragende Ergebnisse erzielt werden (s. Kap. 6.3.3.3). Der Gesamtherstellungsaufwand reduziert sich auf 2 Laboranten zu je 1 Arbeitsstunde.

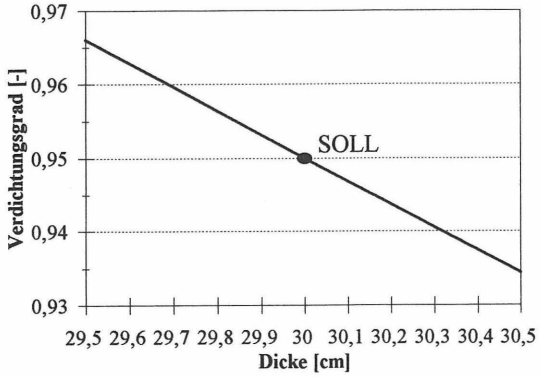


Bild 43:
Einfluß der Nichteinhaltung der Gesamtsolldicke auf den Verdichtungsgrad (Beispiel)

6.3.3.3 Vergleich der Ein- und Ausbaukennwerte

Die Vorgehensweise der Dichtebestimmung für den Einbau eines Bodenkörpers über Massenvorgabe und Volumennachweis ist in Kap. 6.3.3.2 geschildert. Nach Beendigung der Prüfung mit dem dynamischen Plattendruckgerät werden Kontrolldichtebestimmungen nach dem Ausstechzylinder-Verfahren, Prüfung DIN 18125 - F 62, durchgeführt. Aufgrund der relativ geringen plastischen Oberflächendeformationen durch die Fallgewichtsprüfung (s. Kap. 6.3.6.1) ist davon auszugehen, daß die Materialkennwerte über den gesamten Probennahmebereich nicht signifikant beeinflußt werden. Von jeweils 9 gleichmäßig über das Bodenkörpervolumen verteilten Proben aus dem Prüftopf d = 100 cm sind 6 für die Ermittlung des Wassergehaltes und 3 für die Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes k (s. Kap. 6.3.3.4) bestimmt. Aus 3 Proben des Prüftopfes d = 45 cm werden 2 Wassergehalte und ein k-Wert ermittelt.

Trotz aller in den einzelnen Arbeitsvorgängen auftretenden, unvermeidbaren Ungenauigkeiten wird mit einem eingespielten Personalteam eine hervorragende Wassergehaltskonstanz und eine sehr hohe Übereinstimmung von Ein- und Ausbaudichte erzielt. Bild 44 zeigt, daß die Abweichung der Ausbau- bezogen auf die Einbaudichte im Regelfall weniger als 1% beträgt.

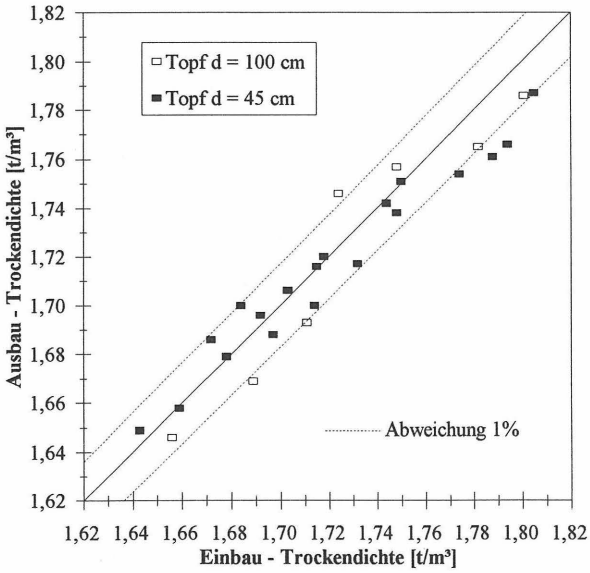


Bild 44: Korrelation von Ein- und Ausbautrockendichte

6.3.3.4 Durchlässigkeitsprüfungen

Die Ergebnisse der Durchlässigkeitsprüfungen an den Proben aus den Prüftöpfen sind in Abhängigkeit von Wassergehalt und Einbaudichte zum Basis-Durchlässigkeitsbeiwert $1 \cdot 10^{-9}$ m/s in Bild 45 dargestellt.

Bei Einhaltung der zulässigen Einbauwassergehaltsgrenzen $w_{Pr} = 0{,}148 \leq w \leq w_{0,95Pr} = 0{,}185$ und des Mindestverdichtungsgrades $D_{Pr} \geq 0{,}95$ kann die Anforderung an den Durchlässigkeitsbeiwert der künstlichen mineralischen Barriere von $k = 1 \cdot 10^{-9}$ m/s erfüllt werden. Die deutlich höheren Meßwerte bei Einbau auf der trockenen Seite der Proctorkurve und bei Nichteinhaltung des Mindestverdichtungsgrades innerhalb der Einbauwassergehaltsgrenzen sowie eine bereits geringfügige Überschreitung im zulässigen Bereich bei geringer Sättigungszahl sind deutlich zu erkennen. Die Relevanz der Einbauparameter im Hinblick auf den Durchlässigkeitsbeiwert (s. Kap. 3) wird nachdrücklich bestätigt.

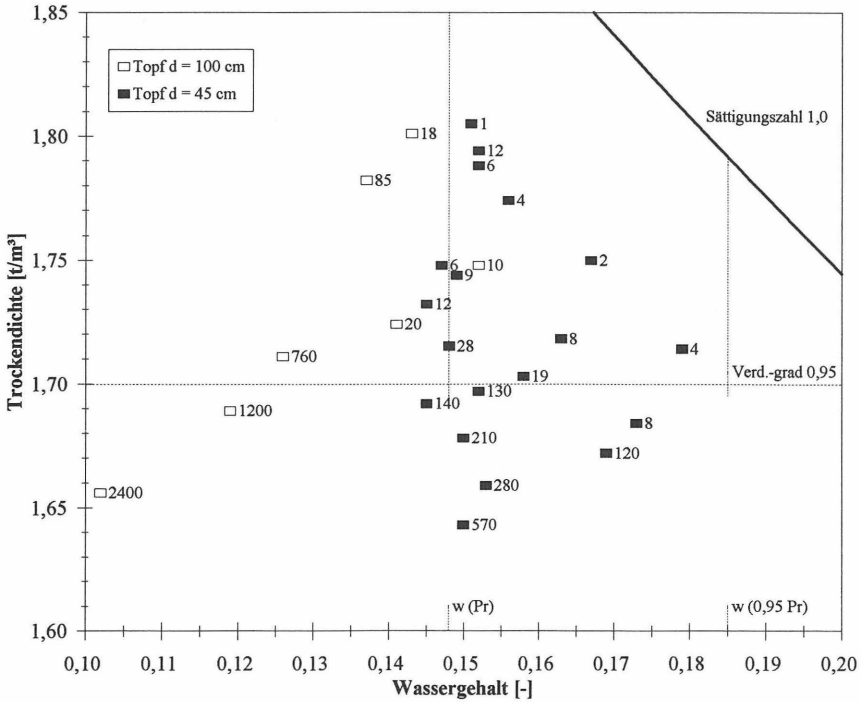


Bild 45: Durchlässigkeitsbeiwerte der Proben, k = (Zahlenangabe) $\cdot 10^{-9}$ [m/s]

6.3.4 Durchführung der Plattendruckversuche

6.3.4.1 Versuchsausführung und Meßwertaufnahme

- Versuchsausführung

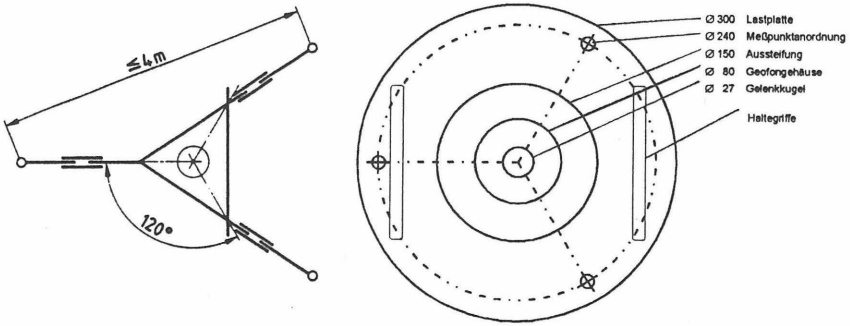
Der Versuchsausführung liegen grundsätzlich die Vorgaben nach TP BF - StB, Teil B 8.3 [12] zugrunde. Die Bodenoberfläche ist zur satten, hohlraumarmen Auflage der Lastplatte im Prüftopf d = 100 cm geringfügig nachzuarbeiten, im Prüftopf d = 45 cm liegt bereits aufgrund des Verdichtungsvorganges eine ideal ebene Oberfläche vor.

- Messungen mit dem dynamischen Plattendruckgerät

In Ergänzung zur Prüfvorschrift wird pro Versuch die Meßstelle durch insgesamt 24 Stöße mit Registrierung der Setzungsamplituden belastet. Die Prüfung beginnt jeweils etwa 30 Minuten nach Herstellung der Prüfkörper.

- Messung der plastischen Setzung (Prüftopf d = 45 cm)

Die Messungen der bleibenden Verformungen der belasteten Oberfläche werden nach jedem Schlag mit dem Fallgewicht in Anlehnung an DIN 18134, Anhang A mit einem Drei-Punkt-Meßverfahren durchgeführt, wobei die mittlere Plattensetzung als Mittel der Messungen an den drei Punkten berechnet wird. Die stoßgeschützten Meßuhren, die in gleichem Abstand vom Plattenmittelpunkt auf Zentriwinkeln von 120° angeordnet sind (Bild 46), ermöglichen Setzungsermittlungen auf 0,01 mm Genauigkeit.



Meßbrückengrundriß Anordnung der Meßuhren

Bild 46: Drei-Punkt-Meßverfahren zur Ermittlung der plastischen Setzung

6.3.4.2 Betrachtungen zur Geschwindigkeitsmessung

Der Verlauf der Platteneindringgeschwindigkeit während eines Schlages ist beispielhaft in Bild 47 skizziert. Beim Aufprall des Fallgewichtes auf die Lastplatte tritt schlagartig eine Geschwindigkeitszunahme auf. Die Einsinkbewegung der Platte endet beim Nulldurchgang der Geschwindigkeit. Bis zum Erreichen dieser Setzungsamplitude ist der Geschwindigkeitsverlauf typisch sinusförmig. Für die anschließend aufwärts gerichtete Plattenbewegung ("Entlastung") werden keine Geschwindigkeiten aufgezeichnet. Erst die erneute Abwärtsbewegung der Platte wird bis zum Ende der Meßwertaufnahme registriert.

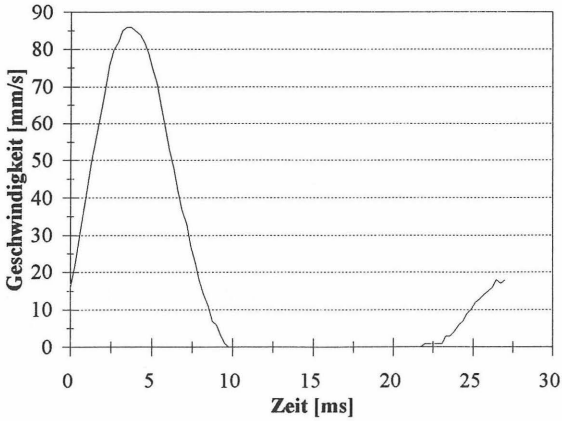


Bild 47: Typischer Verlauf der Platteneindringgeschwindigkeit während eines Schlages

Aufgrund der sinusförmigen Verläufe der Eindringgeschwindigkeiten während der jeweiligen Hauptstöße und des damit direkten mathematischen Zusammenhangs zur Setzungsamplitude wird im weiteren in Anlehnung an die Prüfvorschrift mit den Beträgen der Setzungsamplituden gearbeitet.

Die Ermittlung plastischer Setzungen zur Quantifizierung der Einbauqualität durch eine Auswertung der Schwingungsbewegung über den eigentlichen Hauptstoß eines Schlages hinaus ist nicht möglich. Infolge der Herausfederung der Lastplatte aus der Lage maximaler Eindringung und der dabei nicht gewährleisteten Kongruenz von Bodenoberflächenentlastung und Lastplattenbewegung entstehen ungleiche Randbedingungen. Wie später gezeigt wird (Kap. 6.3.6) genügt bereits aufgrund der Korrelation von Setzungsamplitude und plastischer Setzung, die über das Drei-Punkt-Meßverfahren bestimmt wird, die Angabe der Maximaleinsenkung.

6.3.4.3 Betrachtungen zur Tiefenwirkung

Für die Zielsetzung der Untersuchung des grundsätzlichen Zusammenhangs zwischen dem Einbauzustand des Prüfbodens und den Meßwerten aus Fallgewichtsprüfungen ist die Tiefenwirkung des Meßverfahrens zunächst von untergeordneter Bedeutung. Bei einer Höhe des verdichteten Bodenkörpers von h = 30 cm liegt ein sinnvolles Maß der Mächtigkeit in bezug auf die annähernd vollständige Erfassung der Wirktiefe vor, wie ein beispielhafter Bodeneinbau im Prüftopf d = 45 cm belegt (s.a. [12], KUDLA et al. 1991).

Bei identischen Einbaukennwerten (w = 0,156; $\rho_d \approx 1{,}77$ t/m³) beträgt die Höhe des verdichteten Bodens 6, 12, 18, 24 bzw. 30 cm. Die Ergebnisse der jeweiligen Messungen mit dem dynamischen Plattendruckgerät sind für jeden Schlag und die der plastischen Setzungen mit dem Drei-Punkt-Meßverfahren als Summenkurve bis zum 15. Schlag dargestellt (s. Bild 48).

Mit zunehmender Höhe des Bodenkörpers und damit gleichzeitig wachsendem Abstand zum steifen Untergrund des Gebäudefundamentes tritt in etwa eine Parallelverschiebung der Setzungsamplituden zu höheren Werten und damit auch eine Verringerung der dynamischen Verformungsmodule E_{vd} auf. Der Einfluß des Untergrundes fällt, der des Bodenkörpers steigt. Bei Bodenhöhen von 24 bzw. 30 cm ist aufgrund der Kurvenidentität davon auszugehen, daß die gemessenen Setzungsamplituden vollständig aus der Reaktion des Bodenkörpers resultieren.

Die aufgezeigte Tendenz spiegelt sich bei den plastischen Setzungen nicht wider. Hier stammt der Haupteinfluß aus dem Bodenbereich unmittelbar unterhalb der Lastplatte. Aufgrund der sehr guten Verdichtung und der daher geringen bleibenden Verformungen kommt den Meßungenauigkeiten eine höhere Bedeutung zu.

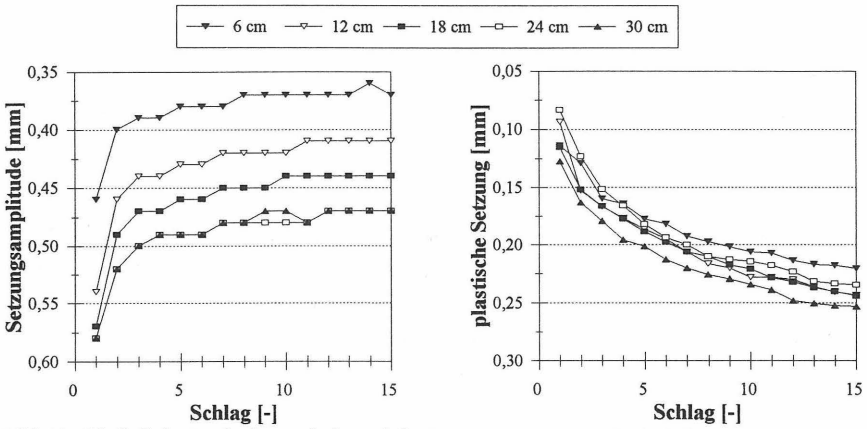


Bild 48: Einfluß der Bodenkörperhöhe auf die Setzungsmessungen (Beispiel)

6.3.5 Auswertung nach TP BF - StB, Teil B 8.3

Nach TP BF - StB, Teil 8.3 [12] ist das Versuchsergebnis der dynamische Verformungsmodul E_{vd} [MN/m²]. Die Zahlenwerte aus den insgesamt 26 Prüftopfversuchen sind in Abhängigkeit von Wassergehalt und Einbaudichte in Bild 49 angegeben. Die Ergebnisse werden für beide Prüftopfdurchmesser, d = 100 cm und d = 45 cm, aufgrund ihrer Identität bzw. ihres in sich schlüssigen Charakters im Grenzbereich gemeinsam ausgewertet.

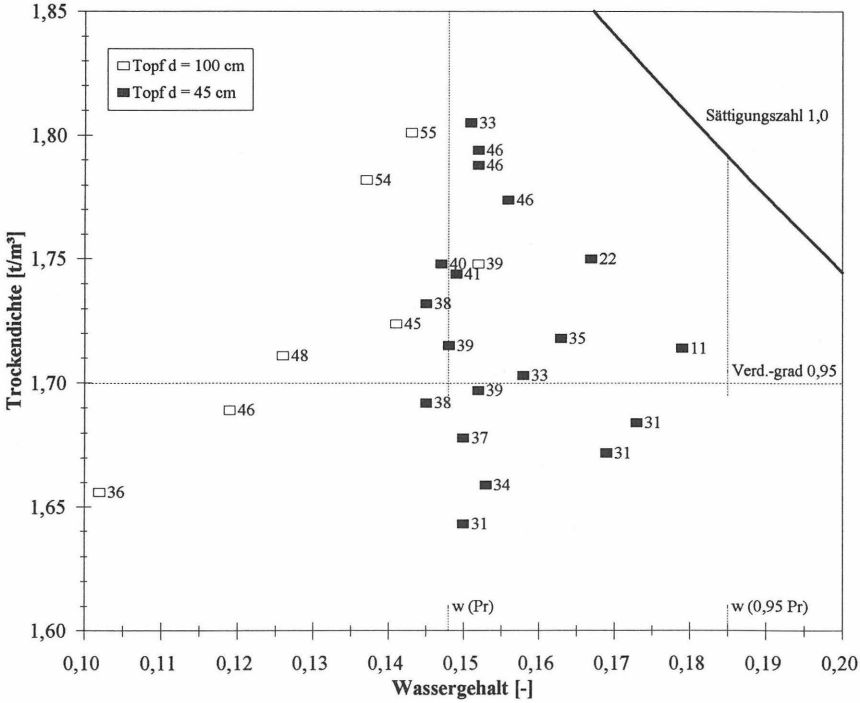


Bild 49: E_{vd} [MN/m²] nach TP BF - StB, Teil 8.3 [12]

Auf der trockenen Seite der Proctorkurve nehmen die dynamischen Verformungsmoduln mit größer werdender Trockendichte des Bodenkörpers zu. Bei einem Anstieg der Trockendichte von etwa ρ_d = 1,65 t/m³ auf ρ_d = 1,80 t/m³, Wachstum ca. 10 %, steigen die Verformungsmoduln von E_{vd} = 36 MN/m² auf E_{vd} = 55 MN/m², Wachstum ca. 50 %. Die bereits für grobkörnige Bodenmaterialien bekannten Untersuchungsergebnisse werden tendenziell bestätigt.

Bei höheren Einbauwassergehalten als dem optimalen Wassergehalt ($w \geq w_{Pr} = 0{,}148$) ist die Sättigung des Porenraumes von maßgebendem Einfluß.

So steigen zwar die Verformungsmoduln bei einem bestimmten Wassergehalt mit größer werdender Trockendichte an - wie auf der trockenen Seite der Proctorkurve -, fallen dann aber bei Erreichen eines bestimmten Sättigungszustandes ab. Im Bereich der Einbauwassergehalte zwischen $w_{Pr} = 0{,}148 \leq w \leq 0{,}155$ zeigt sich zunächst für $\rho_d \leq \rho_{Pr}$ das bekannte Bild. Die E_{vd}-Werte liegen zwischen $E_{vdmin} = 31$ MN/m² bei einer Trockendichte von $\rho_{dmin} = 1{,}64$ t/m³ und $E_{vdmax} = 46$ MN/m² bei $\rho_{dmax} = \rho_{Pr} = 1{,}79$ t/m³. Das entspricht einer Zunahme des Verformungsmoduls von etwa 50 %. Ein weiterer Versuch mit höherer Dichte und dementsprechend höherer Sättigungszahl zeigt mit $E_{vd} = 33$ MN/m² einen geringeren Wert an.

Prüfungen bei höherem Wassergehalt bestätigen diese Grundtendenz. Allerdings verkleinert sich das Spektrum der zulässigen Einbauzustände infolge der auf einen Schnittpunkt zulaufenden Linien für die Sättigungszahl $S_r = 1$ und den Mindestverdichtungsgrad $D_{Pr} = 0{,}95$. Höhere als die in den Proctorteilversuchen erzielten Verdichtungen (s. Bild 41) sind auch mit der in den Prüftopfversuchen eingesetzten Einbau- und Verdichtungsmethodik nicht möglich.

Geht man davon aus, daß der Einbauzustand des Bodenkörpers nicht bekannt ist (Regelfall der Qualitätsprüfung in situ), so ist unter den gegebenen Randbedingungen durch eine Prüfung mit dem dynamischen Plattendruckgerät eine sichere Beurteilung nicht möglich.

Beispiel: Der Meßwert beträgt $E_{vd} = 33$ MN/m². Damit kann nicht entschieden werden, ob der Boden bei etwa optimalem Wassergehalt zu gering oder sehr hoch verdichtet (hohe Sättigungszahl) ist oder, ob bei höherem Wassergehalt ein ausreichender Verdichtungsgrad vorliegt. Eine Zusatzinformation, i.d.R. über den Wassergehalt, ist unerläßlich.

6.3.6 Auswertung aller Meßdaten

6.3.6.1 Setzungsamplituden und plastische Setzungen in der Gesamtbilanz

In Bild 50 sind für die jeweiligen Einbauzustände die Setzungsamplituden s als Mittelwert aus den Schlägen 4 - 6 in [0,01 mm] angegeben. Aus diesen Meßdaten ist der dynamische Verformungsmodul E_{vd} nach der Beziehung

$$E_{vd} = 22{,}5/s \ [\mathrm{MN/m^2}] \qquad (s \text{ in } [\mathrm{mm}])$$

berechnet worden (s. Bild 49). Aufgrund der Proportionalität gelten die Aussagen aus Kap. 6.3.5 sinngemäß.

In Bild 51 sind die plastischen Setzungen in [0,01mm] notiert, die sich nach dem 6. Schlag eingestellt haben. Diese Verformungen wurden seit der Umstellung auf den Prüftopf d = 45 cm gemessen. Die Darstellungsform ist nur unter der Annahme sinnvoll, daß in den einzelnen Versuchen die Lastplatte satt auf einer ideal glatten Bodenoberfläche aufliegt und die Setzungsmaße nicht teilweise auf Anpassungsbewegungen zwischen Platte und Boden sondern ausschließlich auf der Verdichtungsleistung im Bodenkörper basieren. Die erzielten Ergebnisse bestätigen diese Annahme.

Die Analogie zu den Setzungsamplituden und damit zum dynamischen Verformungsmodul ist deutlich ersichtlich. Die Beträge der plastischen Setzungen nehmen mit größer werdender Trockendichte ab. Auch hier wird im Nahbereich zur Sättigungskurve mit 100 % Sättigung gegenüber den Einbauzuständen mit geringerer Sättigungszahl eine Umkehrung der Verhältnisse in Form einer Wertezunahme registriert. Die Differenzen sind allerdings vergleichsweise geringer als bei den Setzungsamplituden.

Den Zusammenhang zwischen Setzungsamplitude und plastischer Setzung veranschaulicht die achsmaßstabsgerechte Darstellung in Bild 52. Es besteht unabhängig vom Einbauzustand eine lineare Beziehung, sofern eine bestimmte Sättigungszahl unterschritten wird. Die Gleichung der Regressionsgerade lautet

$$\text{plastische Setzung} = -70{,}8 + (1{,}68 \cdot \text{Setzungsamplitude}),$$

der Korrelationskoeffizienten beträgt r = 0,90. Bei drei Prüfungen mit herstellungsbedingt größtmöglichem Sättigungszustand, ungefähr dem abfallenden Ast der Proctorkurve entsprechend, steigen die Setzungsamplituden gegenüber den plastischen Setzungen überproportional an.

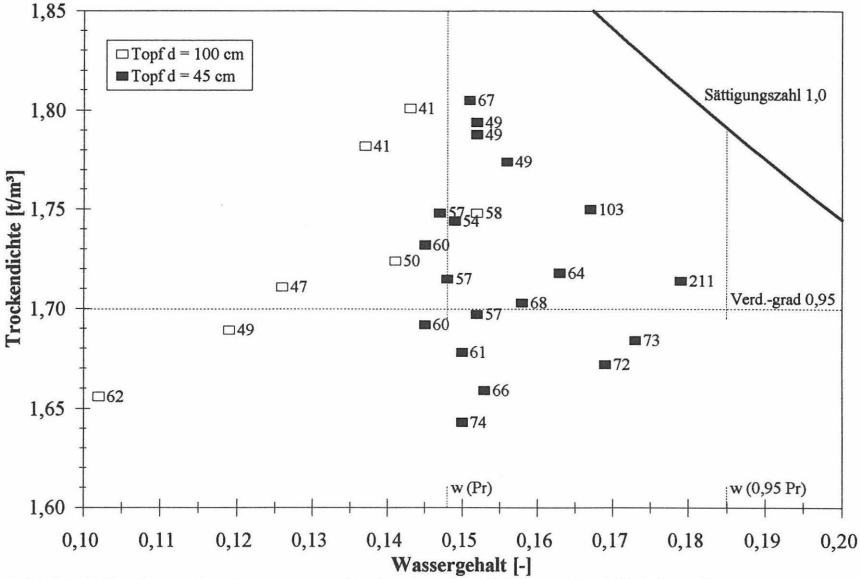


Bild 50: Mittelwert der Setzungsamplituden aus den Schlägen 4 - 6 [0,01 mm]

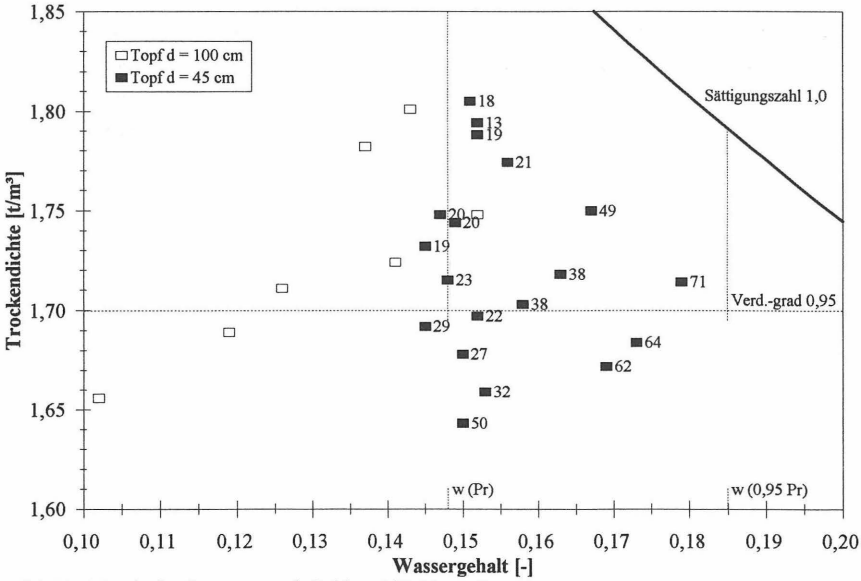


Bild 51: Plastische Setzung nach Schlag 6 [0,01 mm]

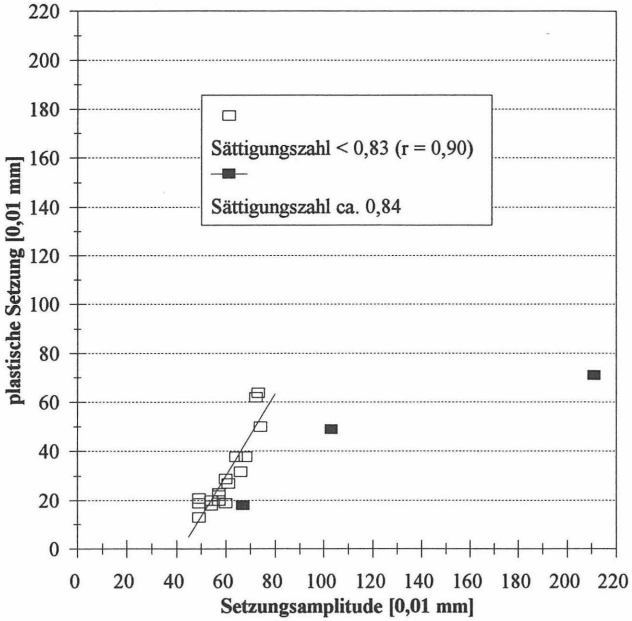


Bild 52: Zusammenhang zwischen Setzungsamplitude (Mittelwert aus Schlag 4 - 6) und plastischer Setzung nach Schlag 6

6.3.6.2 Einfluß der Trockendichte bei optimalem Wassergehalt

6.3.6.2.1 Definition des Analysesektors

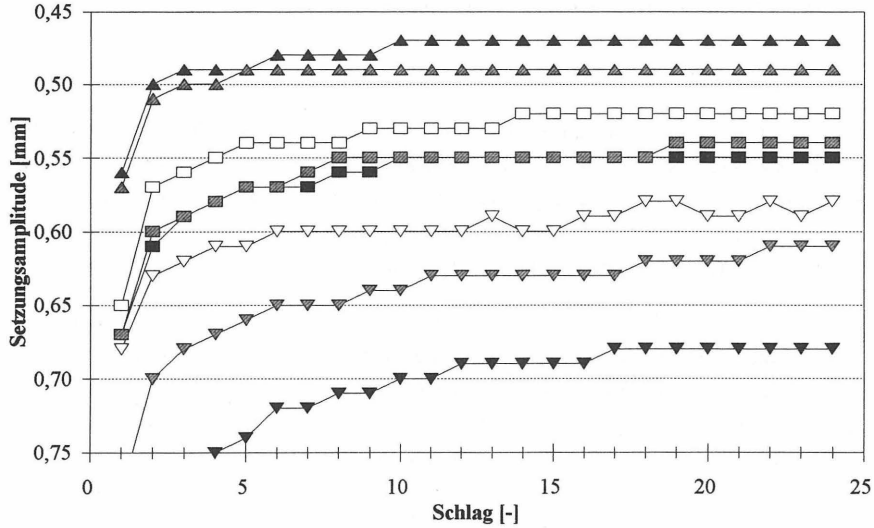
Die bisherigen Ausführungen haben das komplexe Zusammenwirken der Einbauparameter Wassergehalt und Dichte im Hinblick auf die Reaktionswirkung des Bodens bei der Fallgewichtsbeanspruchung mit dem dynamischen Plattendruckgerät aufgezeigt. Nachfolgend werden Setzungsverläufe im Detail dargestellt, Gemeinsamkeiten und Gegensätze beschrieben und die Signifikanz der Regelanforderung von 95 %-Mindestverdichtungsgrad erarbeitet.

Zu diesem Zweck muß eine Eingrenzung möglicher Einbauzustände auf einen Analysesektor vorgenommen werden. Der Idealfall, eine ausreichende Anzahl von Versuchen mit unterschiedlicher Trockendichte bei absolut konstantem Wassergehalt, läßt sich nur mit großem Aufwand herstellen. Analysiert werden daher die Untersuchungsergebnisse aus insgesamt 8 Prüftopfversuchen mit Wassergehalten im Bereich zwischen $w_{Pr} = 0{,}148 \leq w \leq 0{,}155$ und Trockendichten von $\rho_d \leq \rho_{Pr}$. Geringere Wassergehalte sind hinsichtlich der Zielgröße Dichtigkeit nicht relevant. Bei Einbeziehung größerer Wassergehalte, z.B. bis zum Übergang vom steifen in den weichen Zustand bei $w = 0{,}163$, und bei größerer Annäherung an die Sättigungszahl $S_r = 1$ wirkt sich die bereits geschilderte Komplexizität auf die Erarbeitung klarer Zusammenhänge negativ aus. Bezogen auf die Einbauanforderung $w_{Pr} \leq w \leq w_{0,95Pr}$ können mit $w_{0,95Pr} = 0{,}185$ (s. Bild 41) bei der gewählten Spannweite allerdings nur ca. 20 % aller erlaubten Wassergehalte erfaßt werden. Bei der weitergehenden Eingrenzung auf eine steife Zustandsform (s. Kap. 2) erhöht sich dieser Anteil auf ca. 50 %.

6.3.6.2.2 Setzungsverläufe

Die für jeden Schlag ermittelten Setzungsamplituden sind in Abhängigkeit der Einbaudichte des Bodenkörpers in Bild 53 dargestellt. Alle zu Kurven verbundenen diskreten Zahlenwerte weisen die typische Grundtendenz auf. Nach anfänglich hohen Setzungsamplituden tritt eine Abnahme bis zur Konstanz auf. Bis zum Erreichen dieses Zustandes ist bei geringerer Trockendichte eine höhere Schlaganzahl, d.h. mehr Verdichtungsarbeit, erforderlich. Insgesamt ergeben sich bei höheren Trockendichten geringere Setzungsamplituden, weil der Boden aufgrund seiner höheren Steifigkeit der Platteneindringung mehr Widerstand entgegenbringt.

Auch bei den jeweils als Summenkurve dargestellten plastischen Setzungen drückt sich der große Eindringwiderstand durch kleine Verformungen aus. Bei abnehmenden Trockendichten wirken sich die demzufolge zunehmenden Verdichtungsreserven in der größeren bleibenden Verformbarkeit des Bodens unter der Lastplatte aus.



Trockendichte [t/m³]:

1,643 — 1,659 — 1,678 — 1,697 — 1,715 — 1,744 — 1,788 — 1,794

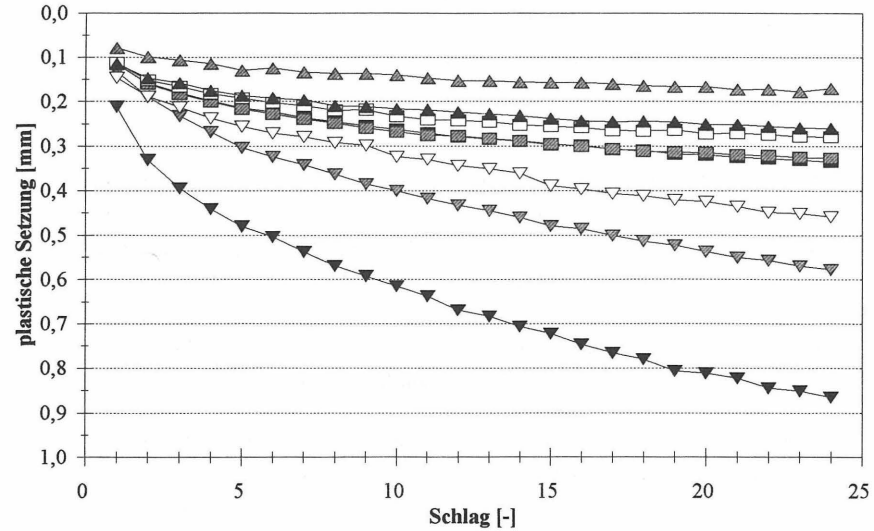
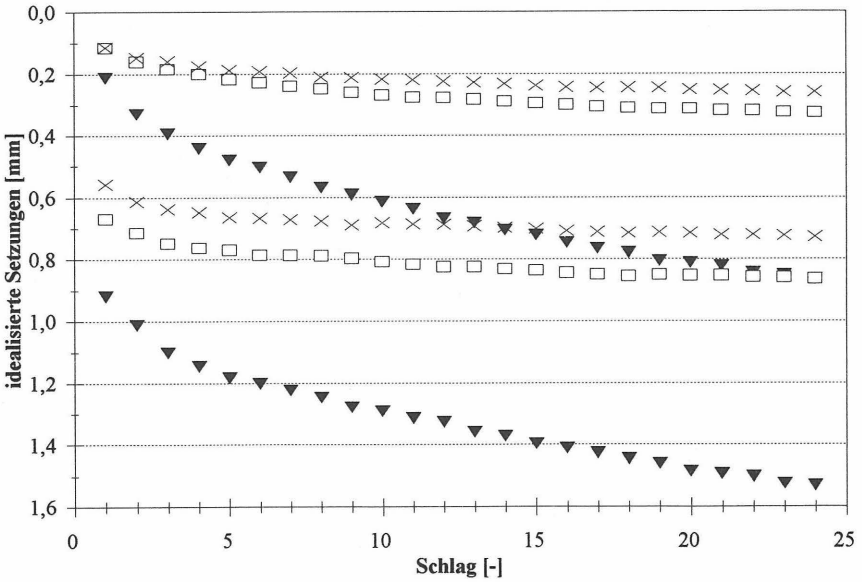


Bild 53: Setzungsamplituden und plastische Setzungen für $w_{Pr} = 0{,}148 \leq w \leq 0{,}155$

Der idealisierte Gesamtsetzungsverlauf der Lastplatte, der sich pro Schlag aus den Extremwerten Setzungsamplitude und plastische Setzung zusammensetzt, ist für 3 ausgewählte Dichten (gering: $\rho_d = 1{,}643$ t/m³, $D_{Pr} \approx 0{,}92$; mittel: $\rho_d = 1{,}715$ t/m³, $D_{Pr} \approx 0{,}96$; hoch: $\rho_d = 1{,}788$ t/m³, $D_{Pr} \approx 1{,}00$) in Bild 54 dargestellt. Ausgehend von der Bezugsebene zu Versuchsbeginn (Setzung 0 mm) wird die Platte beim ersten Schlag zunächst bis zum Betrag der Setzungsamplitude (jeweils untere Linie) in den Boden gedrückt und hebt sich dann um einen elastischen Betrag heraus, so daß eine plastische Setzung (jeweils obere Linie) bleibt. Die Setzungsamplitude des 2. Schlages ist auf diese neue Ebene bezogen, die plastischen Setzungen weiterhin auf die Ausgangsbezugsebene. Der zeitliche Verlauf und die Setzungsverläufe zwischen den Extremwerten bleiben aus Gründen der Übersichtlichkeit unberücksichtigt.

Die annähernde Parallelität zwischen den Verläufen der Setzungsamplituden und den plastischen Setzungen ist deutlich sichtbar. Mit abnehmender Einbaudichte nehmen die Krümmungen der Kurvenverläufe zu.



Trockendichte [t/m³]:	jeweils obere Linie: plastische Setzung nach Schlag
▼ 1,643 □ 1,715 × 1,788	jeweils untere Linie: Setzungsamplitude beim Schlag

Bild 54: Idealisierte Plattenbewegung

6.3.6.2.3 Signifikanz der 95 %-igen Verdichtung

Für die Beurteilung der Qualität eines Einbauzustandes sind Wassergehalt und Dichte von Bedeutung. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, inwieweit - Wassergehalte aus dem vorgegebenen Analysesektor vorausgesetzt - durch die Ergebnisse der Fallgewichtsprüfungen die Einhaltung der Mindestanforderung von i.d.R. $D_{Pr} \geq 0{,}95$ beurteilt werden kann.

Für die 8 Prüftopfversuche sind die mittleren Setzungsamplituden aus den Schlägen 4 - 6, die dynamischen Verformungsmoduln und die plastischen Setzungen in Bild 55 aufgetragen und jeweils punktweise miteinander verbunden. Zwischen Setzungsamplitude und plastischer Setzung zeigt sich der bereits festgestellte lineare Zusammenhang (vgl. Bild 52). Setzungsamplitude und Verformungsmodul unterscheiden sich nur durch den Umrechnungsfaktor.

Bei hoher Bodendichte treten niedrige Setzungen bzw. hohe Verformungsmoduln auf. Mit abnehmender Dichte folgt eine zunächst relativ geringe Zunahme der Setzungen bis zu einer Trockendichte von etwa $\rho_d = 1{,}70$ t/m³, die einem Verdichtungsgrad von 95 % entspricht. Ab hier ist bei weiter fallender Dichte eine deutlich stärkere Setzungszunahme zu verzeichnen.

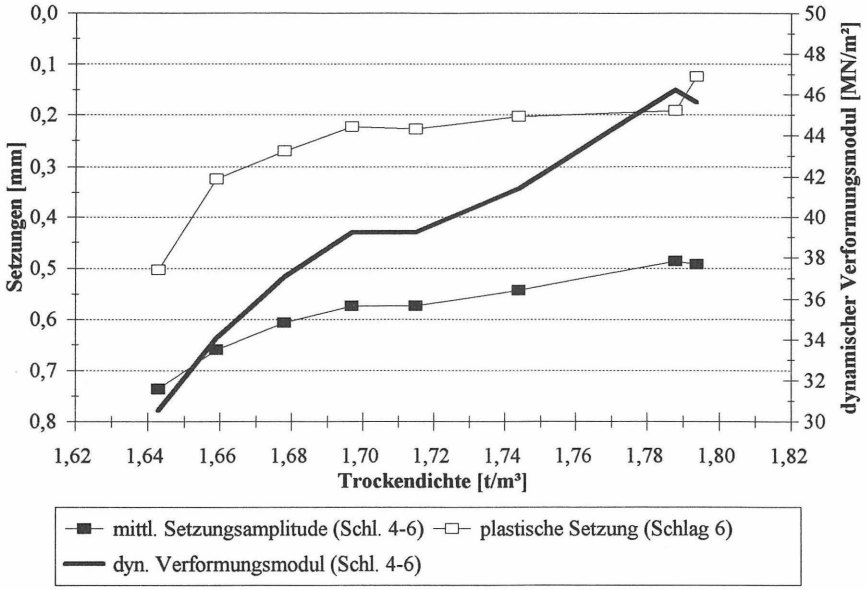


Bild 55: Einfluß der Trockendichte auf Setzungen und dynamischen Verformungsmodul

Unter Berücksichtigung der in den Versuchen vorgegebenen Idealbedingungen könnte folglich das Ergebnis eines weiteren Versuches an Hand dieser "Kalibrierkurve" hinsichtlich der Bodendichte gut beurteilt werden.

Alternativ zur beschriebenen Vorgehensweise der Charakterisierung des Einbauzustandes nach einer bestimmten Schlaganzahl - angepaßt an die TP BF-StB, Teil 8.3 [12] -, können auch die Kurvenverläufe aller Meßwerte eines Versuches interpretiert werden.

So bieten sich für die mathematische Beschreibung der plastischen Setzungen nach Bild 53 Polynome 2-ten Grades mit der allgemeinen Funktionsgleichung

$$y = a + b \cdot x + c \cdot x^2$$

an. Bild 56 zeigt beispielhaft für 3 ausgewählte Bodendichten die gute Anpassung der berechneten an die gemessenen Setzungsbeträge. Die Werte des 1. Schlages finden aufgrund der nicht immer homogenen Anpassung an den Gesamtkurvenverlauf keine Berücksichtigung.

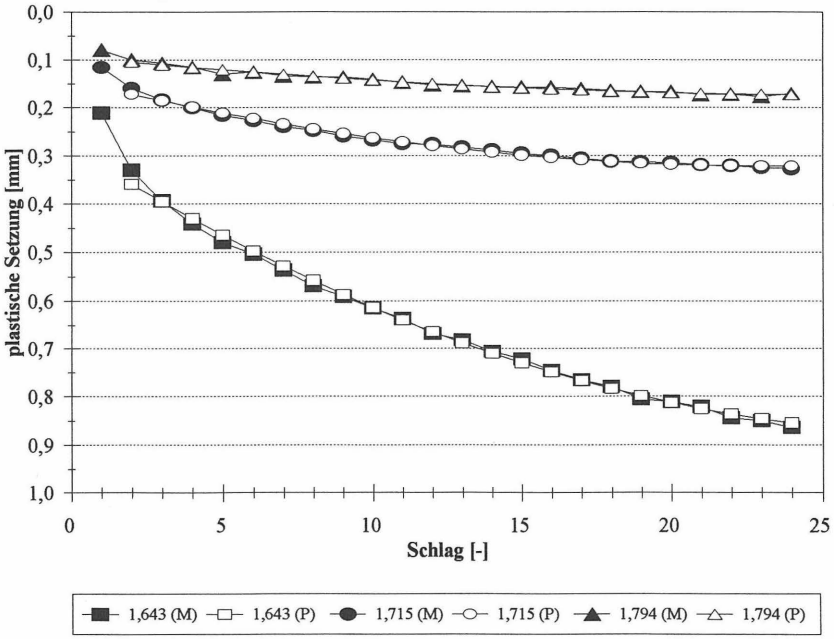


Bild 56: Plastische Setzungen als Meßwerte (M) und als berechnete Werte über Polynome 2-ten Grades (P)

Die aus den Messungen an allen 8 Prüftopfeinbauten resultierenden Hauptkoeffizienten der Polynome b und c sind in Abhängigkeit der Einbautrockendichte in Bild 57 dargestellt.

Für den Hauptkoeffizient b zeigt sich ein eindeutiger Verlauf, vergleichbar mit der Kurvenbeschreibung nach Bild 55. Bei Trockendichten über etwa $\rho_d = 1{,}70$ t/m³ $\cong D_{Pr} = 0{,}95$ treten nur noch kleine Veränderungen in Form einer geringfügigen Werteabnahme auf. Bei geringerer Verdichtung ist eine deutliche Wertezunahme zu beobachten. Für den Betrag des Hauptkoeffizienten c gilt tendenziell dasgleiche.

Je geringer die Einbaudichte des Bodenkörpers ist, desto stärker ist der kurvenförmig dargestellte Verlauf der plastischen Setzung geneigt und gekrümmt. Bei optimaler Verdichtung können bei der Beanspruchung mit dem Fallgewicht naturgemäß kaum noch Nachverdichtungsprozesse stattfinden.

Sowohl aus den Einzelbeträgen der Setzungen (Bild 55) als auch aus dem gesamten Kurvenverlauf (Bilder 56 und 57) kann die Qualität der Einbaudichte abgeschätzt werden.

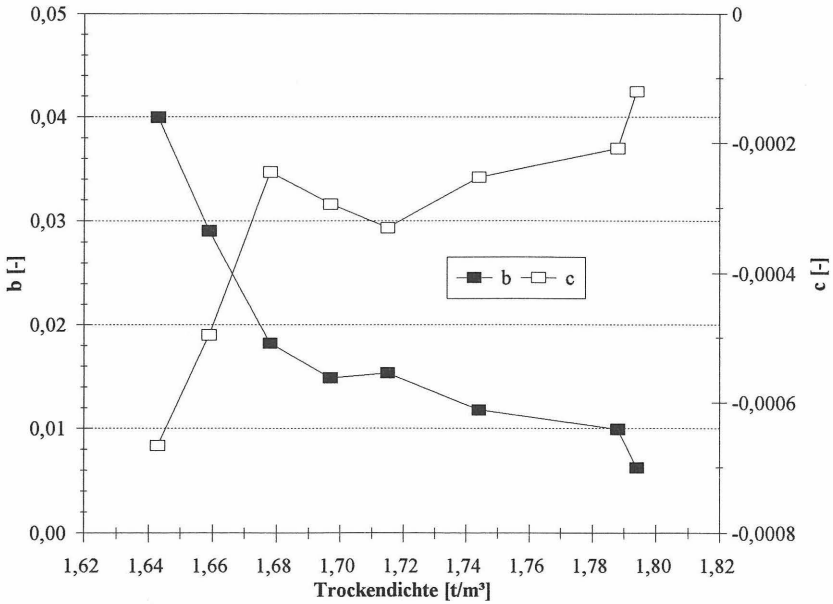


Bild 57: Einfluß der Trockendichte auf die Hauptkoeffizienten der Polynome für plastische Setzungen: $s = a + b \cdot x + c \cdot x^2$

6.3.6.3 Einfluß des Sättigungszustandes

Auf den Einfluß des Sättigungszustandes wurde bereits hingewiesen (s. Bild 52). Zur Präzisierung ist für Bodeneinbauten identischen Sättigungszustandes die Größe der maximalen Platteneindringung in Abhängigkeit vom Wassergehalt dargestellt (Bild 58).

Bei einem bestimmten Wassergehalt und kleiner Sättigungszahl, gleichbedeutend mit hohem Luftporenanteil und geringer Verdichtung, ergeben sich naturgemäß größere Setzungsamplituden. Bei zunehmender Verdichtung bzw. größerer Sättigung reduzieren sich die Setzungsmaße. Diese Erscheinung kann anhand der eingetragenen Ausgleichskurven gut nachvollzogen werden. Zwischen den Ergebnissen bei Bodensättigungszahlen von S_r = 0,785 und S_r = 0,843 tritt in dieser Tendenz ein Bruch auf. Die Setzungsbeträge nehmen schlagartig zu. Neben dem eingetragenen Wertepaar (Wassergehalt = 0,151; Setzungsamplitude = 0,67 mm), Symbol '+', liegen zwei weitere Wertepaare (0,167; 1,03 mm) bzw. (0,179; 2,11 mm) vor, die aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht im Diagramm enthalten sind.

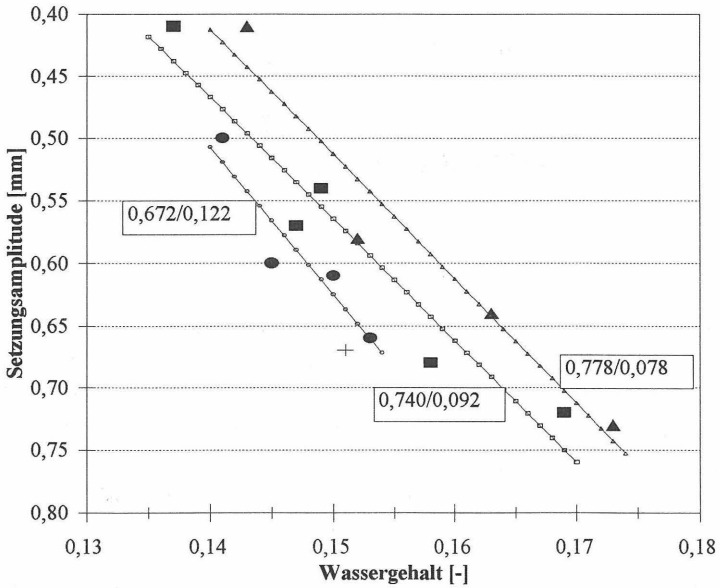


Bild 58: Einfluß des Sättigungszustandes auf die Setzungsamplitude
Wertepaare: Sättigungszahl/Luftporenanteil

6.3.7 Vergleichsuntersuchungen

Vergleichsuntersuchungen wurden durchgeführt, um die mit dem dynamischen Plattendruckgerät in Abhängigkeit vom Einbauzustand gemessenen Setzungsbeträge durch eine andere Art und Weise von Fallgewichtsuntersuchungen qualitativ zu bestätigen.

Die Versuchsapparatur besteht aus einem modifizierten Kompressionsgerät, bei dem im Gegensatz zum Ödometerversuch nach Terzaghi die Seitendehnung der Probe bei Belastung nicht verhindert wird (Bild 59). Die Druckplattengrundfläche (Druckplatte ohne Filterstein) beträgt gegenüber der Prüfbodenfläche etwa 50 %. Der Prüfboden bleibt mit der Last der n-ten Laststufe bis zur Aufbringung der (n+1)-ten Laststufe (jeweils verdoppelt) beansprucht. Die Vorbelastung (1. Belastung) endet bei 0,125 MN/m², die angegebenen Ergebnisse beziehen sich auf die 2. Belastung.

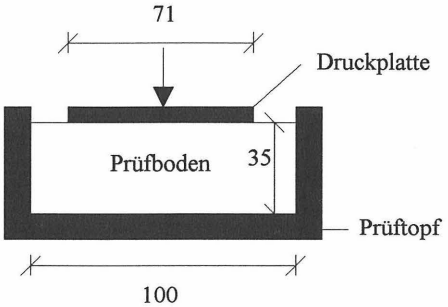


Bild 59: Modifiziertes Kompressionsgerät

Für 2 Einbauwassergehalte und jeweils 6 verschiedene Trockendichten des Prüfbodens ist die Endsetzung als Zunahme zur Endsetzung aus der vorherigen Laststufe in Bild 60 dargestellt. Bei Lasten von mindestens 0,25 MN/m² ist die Abnahme der Setzungen bei zunehmender Trockendichte bis ρ_{Pr} = 1,77 t/m³ deutlich ersichtlich. Bei größerer Dichte (höhere Sättigung) ist auch hier ein Setzungsanstieg zu verzeichnen, der bei höherem Wassergehalt ausgeprägter ist. Aufgrund des hohen Sofortsetzungsanteils sind diese Tendenzen unabhängig vom Zeitpunkt der Ablesung nach Aufbringung der Last.

Der qualitative Verlauf der Setzungen aus Plattendruckversuch und modifiziertem Kompressionsversuch zeigt eine gute Übereinstimmung. Aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen ist ein quantitativer Vergleich nicht möglich. Bei hohen Sättigungszahlen nehmen die Setzungen durch reibungsarme Kornumlagerungsprozesse zu.

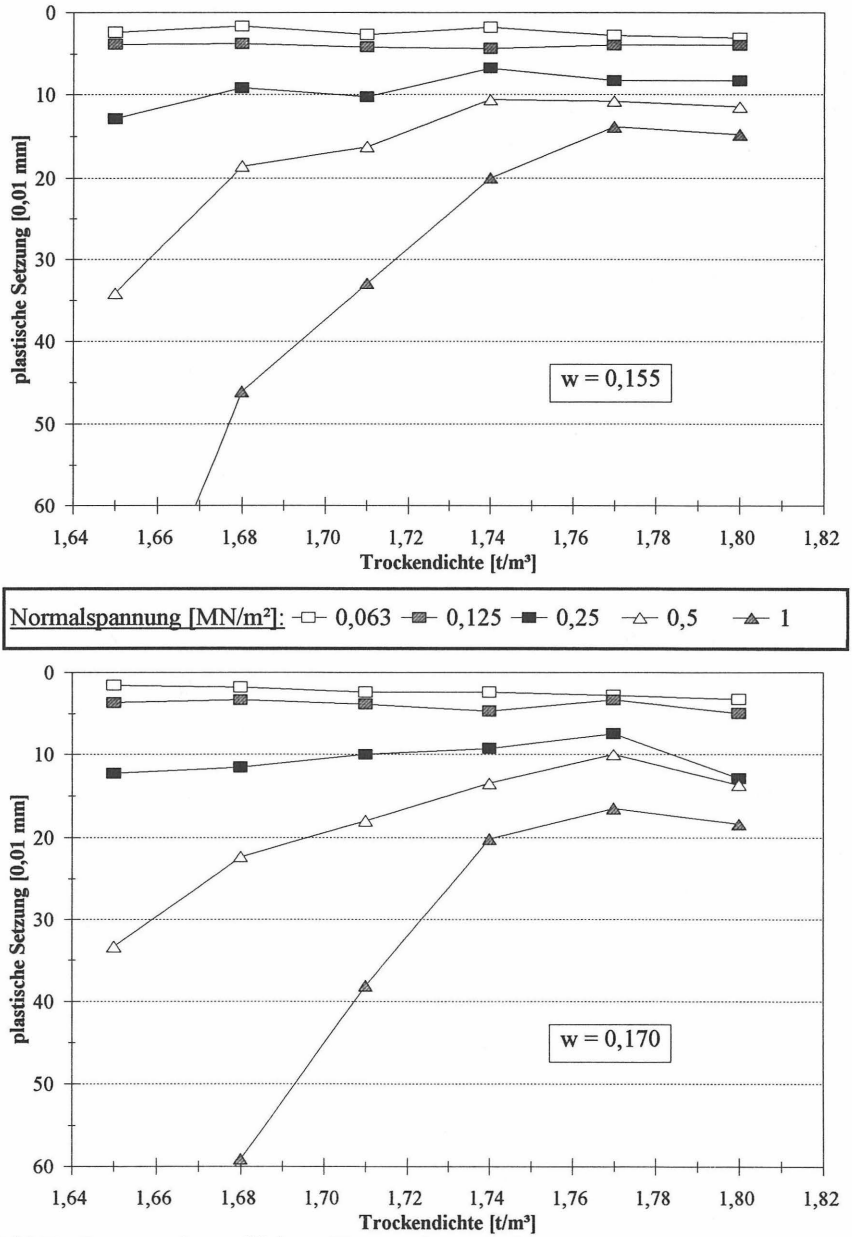


Bild 60: Setzungen im modifizierten Kompressionsversuch

6.3.8 Fazit

Das Reaktionsverhalten eines mineralischen Dichtungsmaterials bei dynamischer Beanspruchung durch Plattendruckversuche kann mit dem entwickelten Laborversuch in Abhängigkeit vom Einbauzustand (Wassergehalt, Dichte) qualitativ und quantitativ erfaßt werden. Durch ideale Randbedingungen - Homogenität des Bodenmaterials, Qualität von Versuchsaufbau und -ausführung - werden mögliche Einflußfaktoren minimiert und in sich schlüssige und reproduzierbare Ergebnisse erzeugt. Setzungsamplituden und plastische Setzungen zeigen tendenziell kongruentes Verhalten, so daß der meßtechnisch einfacheren, sicheren und schnelleren Methode der Amplitudenbestimmung der Vorzug gegeben werden kann.

Während die Ergebnisse für Einbauwassergehalte $w < w_{Pr}$ den bekannten Tendenzen bei grobkörnigen Materialien entsprechen, gilt gleiches für Einbauwassergehalte $w \geq w_{Pr}$ nur bei Unterschreitung eines bestimmten Sättigungszustandes $S_{rGrenz} < S_r = 1$. Hohe Verdichtungen des Prüfbodens bewirken eine geringe Verformbarkeit infolge Platteneindringung bzw. einen großen Verformungsmodul. Bei höheren Verdichtungen als bei der Grenzsättigung S_{rGrenz} nimmt die Verformbarkeit des Materials zu. Eine detaillierte Ursachenanalyse, für die weitergehende praktische und theoretische Untersuchungen erforderlich sind, ist an dieser Stelle in Anbetracht der Kernfrage nach der praktischen Einsatzmöglichkeit des dynamischen Meßverfahrens zur Qualitätskontrolle eingebauter mineralischer Dichtschichten zunächst von untergeordneter Bedeutung.

Für die Praxis ist die Schlußfolgerung von einem erzielten Meßwert auf den zugehörigen Einbauzustand relevant. Für eine sichere Beurteilung ist zumindest eine Zusatzinformation, und zwar sinnvollerweise zur Größe des Wassergehaltes, unentbehrlich.

Die hier zum Nachweis der grundsätzlichen Funktionstüchtigkeit des Verfahrens im Laborversuch produzierten idealen Bedingungen können keine in situ - Verhältnisse repräsentieren, weil bestimmte Einflüsse in ihrer gesamten Vielfalt nicht mit angemessenem Aufwand simulierbar sind:

- Inhomogenitäten im Dichtungsmaterial
- Verdichtungsprinzip (Vibrationstechnik - Fallgewichte)
- Dichtedifferenzen über die Lagendicke
- Zeitdauer zwischen Abschluß der Verdichtungsarbeiten und Prüfbeginn
- Oberflächenveränderung infolge Witterung
- Tiefenwirkung der Messung.

Beispiel: Oberflächenveränderung infolge Witterung

Nachfolgend werden die Auswirkungen einer dreistündigen Antrocknung der Prüfbodenoberfläche bei unterschiedlichen Temperaturen auf die Meßergebnisse mit dem dynamischen Plattendruckgerät demonstriert.

Die Dichte des einlagigen Bodeneinbaus beträgt ρ_d = 1,71 t/m³ bei einem Einbauwassergehalt von w = 0,168. Die unmittelbar nach Abschluß der dynamischen Messungen ermittelten Wassergehaltsverteilungen zeigen deutlich die temperaturabhängige, von der Lagenoberfläche bis zur Tiefe von 5 cm abnehmende Austrocknung des Prüfbodens (Bild 61). Bei einer Temperatur von T = 25° C liegen die Wassergehalte noch etwa innerhalb der zulässigen Einbauwassergehaltsgrenzen von $w_{Pr} = 0{,}148 \leq w \leq w_{0,95Pr} = 0{,}185$. Die Temperatur T = 35° C führt bereits bis in eine Tiefe von etwa 10 - 15 mm zu einer Unterschreitung des erforderlichen Mindestwassergehaltes.

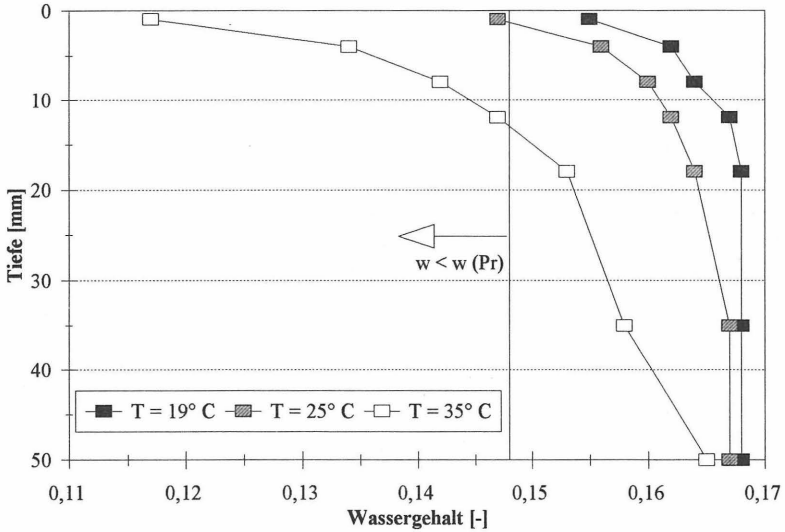


Bild 61: Wassergehalt in Abhängigkeit von Oberflächentemperatur und Tiefe

Die größeren Austrocknungen bewirken höhere Materialsteifigkeiten und folglich geringere Setzungsamplituden (Bild 62). Bei einer Temperaturzunahme von 19° auf 25° C reduzieren sich die Setzungsamplituden bereits um etwa 20 %, bei einer Zunahme von 19° auf 35° C um etwa 30 %.

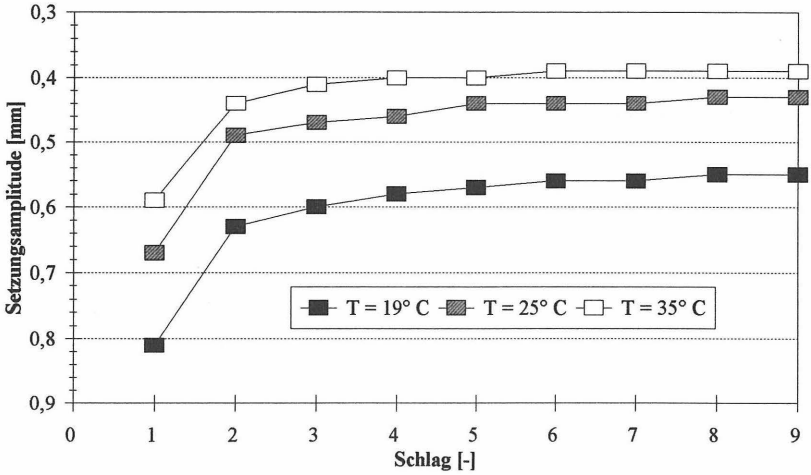


Bild 62: Setzungsamplituden in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur

Es bleibt festzustellen:

Unter der besonderen Berücksichtigung der Einflußvielfalt auf die Meßergnisse und die damit verbundene Problematik der Ergebnisinterpretation ist die praxistaugliche Anwendung von Fallgewichtsuntersuchungen im Rahmen von Qualitätsprüfungen nur unter sehr eingeschränkten Randbedingungen denkbar. Entscheidend für die Güte der Einbauqualität und die Zuverlässigkeit der Qualitätssicherung sind die Materialeigenschaften und die Einbauvorgänge. Höchste Anforderungen an die Homogenität und einen systematisierter Bauablauf sind die Garanten des Erfolges. Die Untersuchungen lassen bei entsprechender Vorgehensweise mit Wassergehalten geringfügig über dem optimalen für das untersuchte Material brauchbare Ergebnisse erwarten.

6.4 Feldversuche an mineralischen Dichtungen

6.4.1 Übersicht

Parallel zu den Laboruntersuchungen wurde die Einsetzbarkeit des dynamischen Plattendruckversuches als Qualitätsprüfverfahren in der Praxis des mineralischen Dichtungsbaus geprüft. Dabei erweist es sich in Anbetracht der Vielfalt potentieller Einflußfaktoren als nur möglich und zugleich aber auch ausreichend Tendenzen aufzuzeigen.

Exemplarisch werden die charakteristischen Ergebnisse für zwei vollkommen verschiedene Dichtungsmaterialien vorgestellt. Zum einen handelt es sich um ein Sand-Ton-Gemisch ST*, das die Anforderungen an mineralisches Dichtungsmaterial für künstliche mineralische Barrieren erfüllt und dessen Prüfbarkeit im Labormaßstab ausführlich untersucht wurde (Kap. 6.3), und zum anderen um ein Tonmaterial als einen der hochwertigsten Dichtungsbaustoffe.

Bei der Auswertung der Feldversuche ist grundsätzlich zu berücksichtigen, daß die möglichen Kombinationen von Wassergehalt und Trockendichte nicht wie bei den Laborversuchen durch planmäßige Wassergehaltseinstellung und Verdichtungsleistung in etwa wunschgemäß eingestellt werden können, sondern aus den Gegebenheiten in situ resultieren. Damit ergibt sich für diese Einbauparameter eine nur eingeschränkte Bandbreite.

In Anlehnung an die Versuchsausführung bei der Prüfung eines nichtbindigen Deponieauflagers (Kap. 6.2.2) wurde an den jeweiligen Prüfstellen zunächst der dynamische Plattendruckversuch nach TP BF-StB, Teil 8.3 [12] mit größtmöglicher Sorgfalt durchgeführt. Auch hier befinden sich die Ansatzebenen für die nachfolgenden Vergleichsuntersuchungen mit dem Ausstechzylinderfahren nach DIN 18125, T2 unter Berücksichtigung der Problematik der Zuordnung Meßstelle → Bezugsfläche unterhalb der Lastplattenauflageebene.

6.4.2 Versuche am Sand-Ton-Gemisch

6.4.2.1 Klassifikation

Die bodenmechanischen Kennwerte des Dichtungsmaterials entsprechen grundsätzlich den in Kap. 6.3.2.2 aufgeführten. Im untersuchten Bauabschnitt aufgetretene Schwankungen in den Materialeigenschaften sind aufgrund ihrer Geringfügigkeit nicht von Bedeutung.

6.4.2.2 Verdichtungseigenschaften

Zur Beurteilung der Einbaukennwerte kann der Proctorversuch, Kap. 6.3.2.3, zugrundegelegt werden.

6.4.2.3 Meßergebnisse

Die Versuche wurden im Anschluß an die eigentliche Verdichtungsarbeit mit der Stampffußwalze und der Oberflächeneinebnung mit der Glattmantelwalze ausgeführt. Um den Charakter einer zerstörungsfreien oder quasi-zerstörungsfreien Prüfung zu wahren, ist vor der Versuchsdurchführung ein Bodenvolumen mit höchstens 2 cm Tiefe entfernt worden. Die Ansatzebene zweier parallel entnommener Ausstechzylinder liegt etwa 2 cm unter der Ebene des Lastplattenauflagers.

Bei der Darstellung des Zusamenhanges zwischen Trockendichte und dynamischem Verformungsmodul muß unter Beachtung der Auswertung der Laborversuche und im Gegensatz zu der Auswertung der Versuche auf dem Sandplanum der Einfluß des Wassergehaltes berücksichtigt werden. Bild 63 zeigt die Gegenüberstellung der Ergebnisse von 20 Prüfstellen. Flächenabschnitte mit zu trockenem bzw. zu feuchtem und unzureichend verdichtetem Material sind im Meßprogramm bewußt enthalten, um, ähnlich wie bei den Laboruntersuchungen, die Möglichkeit der Abgrenzung von zulässigem und unzulässigem Einbaubereich zu prüfen.

Die Verformungsmoduln betragen im gesamten festgestellten Wassergehaltsbereich Werte von $10{,}3\ MN/m^2 \leq E_{vd} \leq 16{,}7\ MN/m^2$ und im zulässigen Wassergehaltsbereich ($0{,}148 \leq w \leq 0{,}185$) von $10{,}3\ MN/m^2 \leq E_{vd} \leq 12{,}8\ MN/m^2$.

Im Vergleich zu den Ergebnissen aus den Laborversuchen (Bild 49) sind deutliche Unterschiede in Bezug auf

- die Größenordnung der Meßwerte
- den Zusammenhang der Meßwerte untereinander

festzustellen.

a) Größenordnung der Meßwerte

Im Laborversuch beträgt der dynamische Verformungsmodul $11\ MN/m^2 \leq E_{vd} \leq 55\ MN/m^2$. Lediglich im Bereich $w \approx 0{,}18$ und $\rho_d \approx 1{,}70\ t/m^3$ ist mit $E_{vd} \approx 11\ MN/m^2$ in beiden Versuchsreihen eine Übereinstimmung feststellbar, ansonsten treten im Feldversuch deutlich kleinere Meßwerte auf. Damit ist hier die Ergebnisauflösung bzw. die Schwankungsbreite der Meßwerte auf den ersten Blick relativ klein. Im zulässigen Wassergehaltsbereich beträgt sie jedoch im-

merhin noch ca. 20 %. Vergleicht man diesen Wert mit der auftretenden Schwankungsbreite der Trockendichten von etwa 5 %, so ergibt sich jedoch ein etwa vierfach höheres Auflösungsvermögen.

b) Zusammenhang der Meßwerte untereinander

Trotz des relativ günstigen Auflösungsvermögens ergibt sich kein sinnvoller auf die Einbaukennwerte Wassergehalt und Trockendichte bezogener Zusammenhang. Geht man davon aus, daß der Einbauzustand des Bodenkörpers nicht bekannt ist (Regelfall), so ist durch diese Prüfung eine sichere Beurteilung nicht möglich. Im Gegensatz zu den Laborversuchen gilt dieses auch, wenn als Zusatzinformation der Wassergehalt bekannt ist. Beispiel: Der Meßwert beträgt E_{vd} = 10,3 MN/m². Dieser Meßwert tritt bei mehreren völlig unterschiedlichen Einbauzuständen auf.

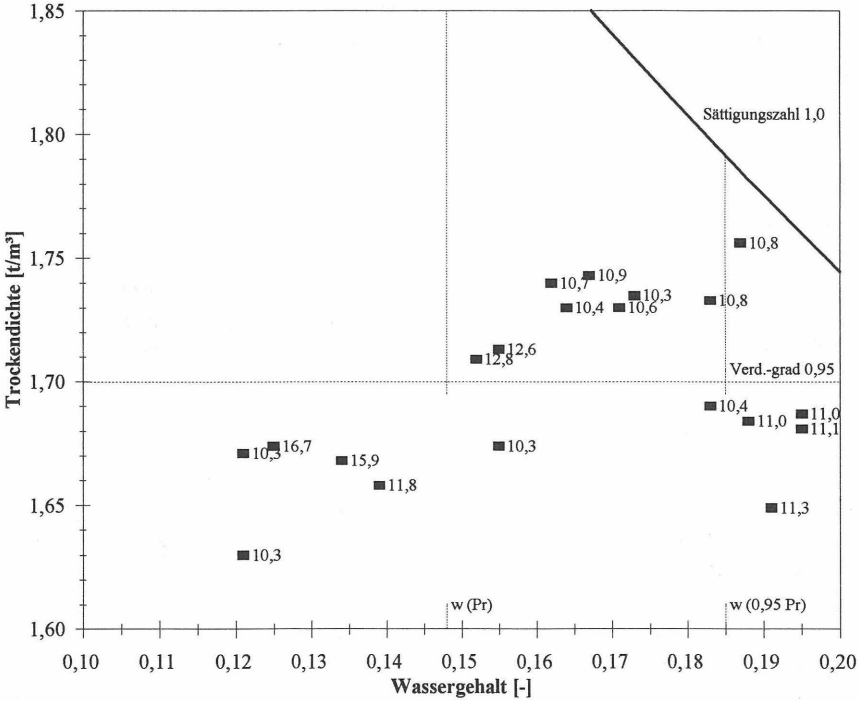


Bild 63: Zusammenhang Wassergehalt, Trockendichte und dynamischer Verformungsmodul für ein eingebautes Sand-Ton-Gemisch ST*

Bei der Beantwortung der Frage nach den Ursachen muß vorweg festgehalten werden, daß die Ergebnisse der Wassergehalt- und Dichtebestimmungen mit dem Ausstechzylinderverfahren kein Garant für die Wiedergabe der realen Verhältnisse im gesamten Einflußbereich unterhalb der Lastplatte sind, so daß geringfügige Verschiebungen der Meßpunkte im Bild 63 durchaus möglich sein können. Dieser Problemkreis besteht bei den Laborversuchen nicht, wie z.B. der Vergleich der Ein- und Ausbauwerte (Bild 44) zeigt.

Die Ursachen für die schwer interpretierbaren Ergebnisse sind in der Superposition verschiedener Effekte, die im einzelnen bereits in Kap. 6.3.8 angesprochen sind, zu finden. Die geringen Werte für die Verformungsmoduln resultieren aus einer relativ großen Bewegung bzw. Maximaleinsenkung der Lastplatte infolge der Schlagwirkung des Fallgewichtes. Dabei kommt dem eigentlichen Verdichtungsvorgang eine besondere Bedeutung zu. Es ist zu vermuten, daß bei diesem Dichtungsmaterial - ähnlich wie bei der Verdichtung nichtbindiger Materialien - infolge des Abrollvorganges der Walzenbandage unmittelbar im oberflächennahen Bereich in gewissen Grenzen eine Auflockerung entsteht. Würde dieser gestörte Zonenbereich vollständig entfernt, so wäre die Forderung nach einer zerstörungsfreien Prüfung nicht mehr erfüllt.

6.4.3 Versuche am Ton-Material

6.4.3.1 Klassifikation

Die Korngrößen des Dichtungsmaterials gehören zu etwa 50 % Massenanteil dem Tonbereich und 45 % dem Schluffbereich an, s. Körnungslinie Bild 64.

Die Fließgrenzen von $w_L \approx 0{,}73$ und die Plastizitätszahlen von $I_P \approx 0{,}50$ weisen das Bodenmaterial entsprechend der Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke nach DIN 18196 als ausgeprägt plastischen Ton TA aus. Der mittlere Glühverlust beträgt etwa $V_{gl} \approx 0{,}05$, der mittlere Kalkgehalt $V_{Ca} \approx 0{,}04$ und die Korndichte $\rho_s \approx 2{,}72$ t/m³.

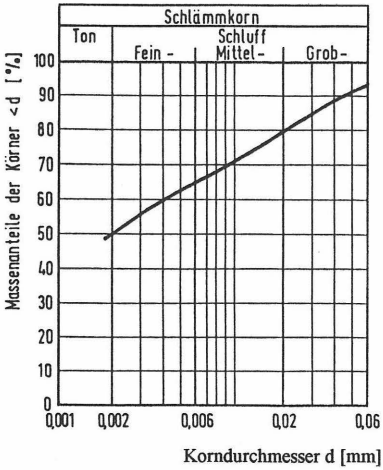


Bild 64: Körnungslinie des Ton-Materials

6.4.3.2 Verdichtungseigenschaften

Zur Beurteilung der Einbaukennwerte kann der Proctorversuch nach Bild 65 zugrundegelegt werden.

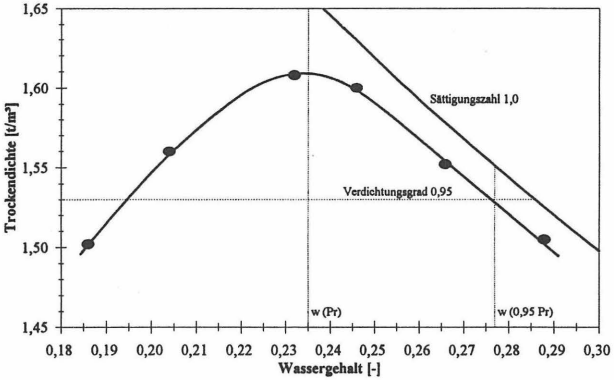


Bild 65: Proctorkurve für das Ton-Material

6.4.3.3 Meßergebnisse

Die Versuche wurden teilweise im Anschluß an die eigentliche Verdichtungsarbeit mit der Stampffußwalze und der Oberflächeneinebnung mit der Glattmantelwalze und teilweise auf einer Miete, bei der aus Witterungsschutzgründen nur die Oberfläche des aufbereiteten Dichtungsmaterials mit der Glattmantelwalze versiegelt wurde, durchgeführt. Damit konnten auch verschiedene unzureichende Verdichtungszustände geprüft werden. Da sich infolge der Nachverdichtung durch den dynamischen Plattendruckversuch nur minimale plastische Verformungen einstellten, wurde die Ansatzebene zweier parallel entnommener Ausstechzylinder bei etwa 0,5 cm unter der Ebene des Lastplattenauflagers festgelegt.

Bild 66 zeigt die Gegenüberstellung der Ergebnisse von 20 Prüfstellen.

Die Verformungsmoduln betragen im Wassergehaltsbereich um den optimalen Wassergehalt ($0{,}230 \leq w \leq 0{,}247$) je nach Trockendichte Werte zwischen $11\ MN/m^2 \leq E_{vd} \leq 66\ MN/m^2$. Hier kann eine Parallele zu den Ergebnissen der Laborversuche am Sand-Ton-Gemisch festgestellt werden: Bei niedrigen Trockendichten bzw. Verdichtungsgraden treten große maximale Einsenkungen der Lastplatte und damit geringe Verformungsmoduln auf. Je höher die Trockendichte wird, je größer ist der Verformungsmodul. Bis zu einem geforderten Verdichtungsgrad von $D_{Pr} \geq 0{,}95$, entsprechend einer Trockendichte von $\rho_d \approx 1{,}53\ t/m^3$, liegen Verformungsmoduln von bis zu $E_{vd} \approx 19\ MN/m^2$ vor.

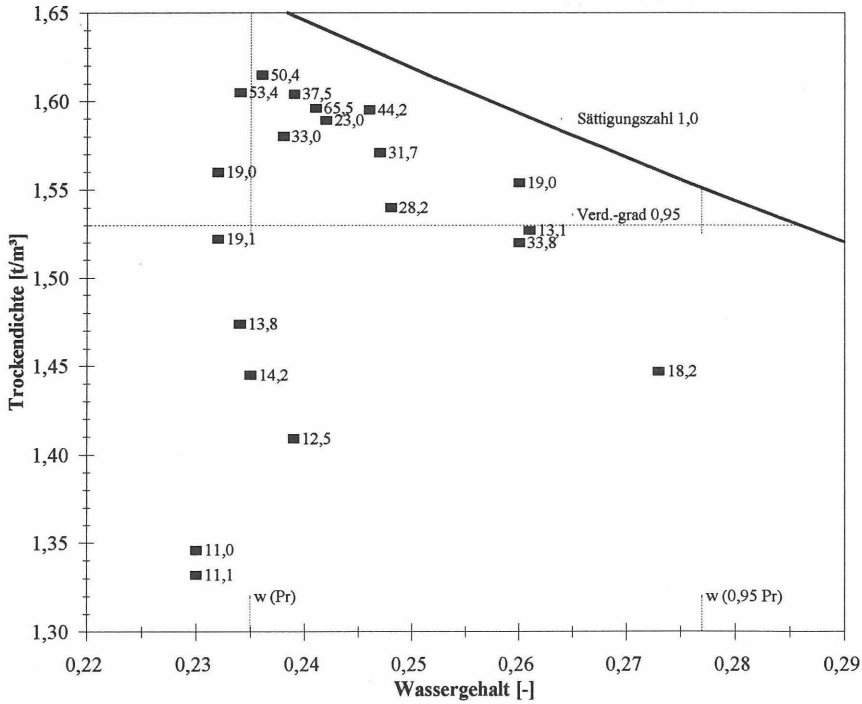


Bild 66: Zusammenhang Wassergehalt, Trockendichte und dynamischer Verformungsmodul für das eingebaute Ton-Material

Im Bereich der größtmöglichen Verdichtung ist mit 23 MN/m² ≤ E_{vd} ≤ 66 MN/m² eine deutliche Schwankungsbreite der Verformungsmoduln gegenüber den ermittelten Trockendichten feststellbar. Ein unmittelbarer Zusammenhang der Meßwerte untereinander liegt nicht vor. Die Ursache kann nur in den lokalspezifischen Bedingungen, im wesentlichen in den Eigenschaften des Lastplattenauflagers und der oberflächennahen Verhältnisse begründet sein.

Ähnlich wie bei den Laborversuchen ist bei höheren Wassergehalten eine exakte Beurteilung der Meßwerte aus dem Plattendruckversuch hinsichtlich der Entscheidungsfrage, Anforderung erfüllt oder nicht erfüllt, nicht möglich.

6.4.4 Fazit

Bei der Durchführung und Bewertung dynamischer Plattendruckversuche in situ an gemischt- oder feinkörnigen Bodenmaterialien tritt eine Vielzahl von Einflußfaktoren auf. An Hand der Untersuchungsergebnisse kann festgestellt werden:

Bei gemischtkörnigem Bodenmaterial lassen das Meßergebnis beeinflussende oberflächennahe Störungen, die im wesentlichen aus dem Verdichtungsvorgang resultieren, keine zuverlässige Ergebnisauflösung zu. Großvolumige Entfernungen dieser Bereiche sprechen einer zerstörungsfreien Prüfung entgegen.

Die Prüfung eines Tonmaterials läßt bei Einbau mit etwa optimalem Wassergehalt einen Zusammenhang zur Trockendichte tendenziell erkennen. Durch die Materialeigenschaften wird allerdings die Herstellung einer ordnungsgemäßen Prüfoberfläche erschwert, insbesondere bei nicht erforderlichem maschinellen Glättungsvorgang mit Glattmantelwalzen. Die zeitintensiven und mit dem Risiko schwer interpretierbarer Ergebnisse behafteten Vorbereitungsarbeiten stehen einer zügigen (möglichst flächendeckenden) und sicheren Qualitätsprüfung entgegen.

6.5 Bewertung des Prüfverfahrens

In der Literatur wird vielfach von verschiedenen Ansätzen zur Kontrolle einer Erdbaumaßnahme mit Fallversuchen berichtet. Vergleichbare Verfahren existieren beispielsweise bei der Betonprüfung (Brinell-Hammer). Der Grundgedanke, die Schlagwirkung eines Körpers auf das zu prüfende Medium zu quantifizieren und daraus Materialeigenschaften abzuleiten, ist nachvollziehbar. So kann bereits bei einfachen Kugelfallversuchen über den Durchmesser des Kugelabdruckes ein Zusammenhang zur Trockendichte des Bodenmaterials nachgewiesen werden.

Bild 67 zeigt beispielhaft die Wirkung einer aus 40 cm Höhe fallenden ∅ 70 mm - Stahlkugel, die auf ein im Versuchszylinder d = 150 mm verdichtetes Sand-Ton-Gemisch (Kap. 6.3.2.2) trifft. Die Darstellung verdeutlicht jedoch gleichzeitig den erheblichen Einfluß des Wassergehaltes auf den Kugelabdruckdurchmesser bzw. die Eindringtiefe. Die Laborversuche mit dem dynamischen Plattendruckversuch, die auf einem ähnlichen Prinzip basieren, haben ebenfalls bestätigt, daß bei vergleichbarem Wassergehalt zwischen der Trockendichte und dem Eindringverhalten der Lastplatte ein Zusammenhang besteht.

Bei der Frage nach der Übertragbarkeit der unter idealen Bedingungen durchgeführten Laborversuche - nur Wassergehalt und Trockendichte variabel - auf die Verhältnisse in situ kommt

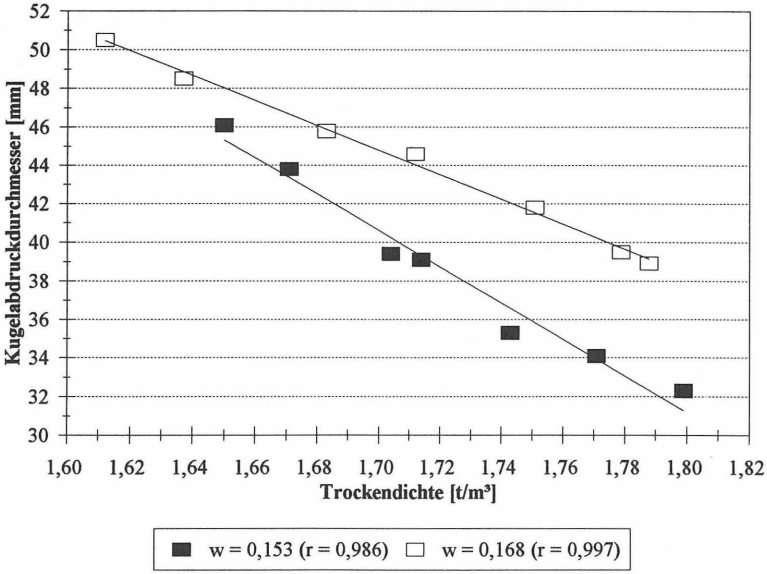


Bild 67: Zusammenhang Kugelabdruckdurchmesser zu Trockendichte

eine Superposition verschiedener, im einzelnen kaum quantifizierbarer Effekte zum Tragen:

- Inhomogenitäten im Dichtungsmaterial
- Verdichtungsprinzip (Vibrationstechnik - Fallgewichte)
- Dichtedifferenzen über die Lagendicke
- Zeitdauer zwischen Abschluß der Verdichtungsarbeiten und Prüfbeginn
- Oberflächenveränderung infolge Witterung
- Tiefenwirkung der Messung.

Die daraus entstehende Unsicherheiten bei der Bewertung der Prüfergebnisse machen das Verfahren unpraktikabel und zudem führt die beim Einbau gemischt- und feinkörniger Dichtungsmaterialien üblicherweise eingesetzte Verdichtungstechnik mit Stampffußwalzen infolge der Oberflächenunebenheiten zu deutlich verlängerten Versuchsdauern.

Auch hier muß, wie bei der Prüfung mit radiometrischen Meßverfahren festgestellt werden, daß optimierte Materialhomogenitäten sich positiv auf die Meßbarkeit auswirken.

7. SCHLUSSBEMERKUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

In Anbetracht des hohen Bedarfs an leistungsfähigen, fehlerfreien mineralischen Dichtungen für Deponie- und Wasserbauwerke ist die Entwicklung von aussagekräftigen, netzverdichtenden (im Idealfall vollständig flächendeckenden) Prüfmethoden auf zerstörungsfreier Basis zur Beurteilung der Dichtungsqualität von besonderem Interesse.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die baupraktischen Einsatzmöglichkeiten zerstörungsfreier Meßverfahren diskutiert und anhand zahlreicher Labor- und Felduntersuchungen, die auf den radiometrischen Verfahren und dem dynamischen Plattendruckversuch beruhen, analysiert. Bild 68 zeigt schematisch den Aufbau und die Ergebnisse der Arbeit in einem Ablaufdiagramm mit Verweisen auf die jeweiligen Kapitel.

Nur mit den radiometrischen Verfahren sind gleichzeitig die maßgebenden Einbauparameter Wassergehalt und Dichte bestimmbar. Während der Wassergehalt stets zerstörungsfrei gemessen wird, ist bei der Dichtebestimmung die Einsatzmöglichkeit als zerstörungsfreie Messung vom Optimierungsgrad der Aufbereitung des mineralischen Dichtungsmaterials abhängig. Für ein Beispiel aus der Praxis wird aufgezeigt, daß bei ausreichender Homogenität die zerstörungsfreie Prüfung sinnvoll möglich ist, gleichzeitig das Ausmaß von Fehlstellen reduziert werden kann und eine Verbesserung der Gesamtdichtigkeit nachweislich festzustellen ist.

Der Einsatz des Verfahrens sollte grundsätzlich projektspezifisch geprüft werden. Entscheidend ist die erreichbare Dichtekonstanz über die Lagendicke. Die Erfahrungen am Beispiel des leicht plastischen Tons zeigen: Hohe Wassergehalte wirken sich diesbezüglich positiv aus. Bei Wassergehalten nahe der unteren, zulässigen Einbauwassergehaltsgrenze (i.d.R. optimaler Wassergehalt) ist besonders bei geringer oberflächennaher Trockendichte zusätzlich eine zerstörende Messung in größerer Tiefe zu empfehlen. Die sicherste Verfüllungsmethode des Bohrloches ist materialspezifisch zu prüfen.

Bild 68: Ablaufdiagramm der Arbeit
(s. nachfolgende Doppelseite)

Fertiggestellte mineralische Dichtung

↓

Qualitätsprüfung
Kap. 2

↓

Verdichtungsprüfung: Relevanz und Effektivität
Kap. 3

↓

Zielgröße Dichtigkeit

↓

Zusammenhang
Dichtigkeit/Verdichtung

↓

Bewertung von Prüfmethodiken

↙ ↓ ↘

subjektive Meßstellenauswahl
(= Praxis)
- Zuordnung Meßstelle → Bezugsfläche

statistischer Prüfplan
- Lokalisierung mangelhaft verdichteter Flächen

flächendeckende Prüfverfahren
(walzenintegrierte Meßsysteme)
- Nachweis der Qualifikation

↘ ↙

Optimierungsansatz für Zusatzprüfmetode
Kriterium: 1. zerstörungsfrei
2. schnell bzw. flächendeckend

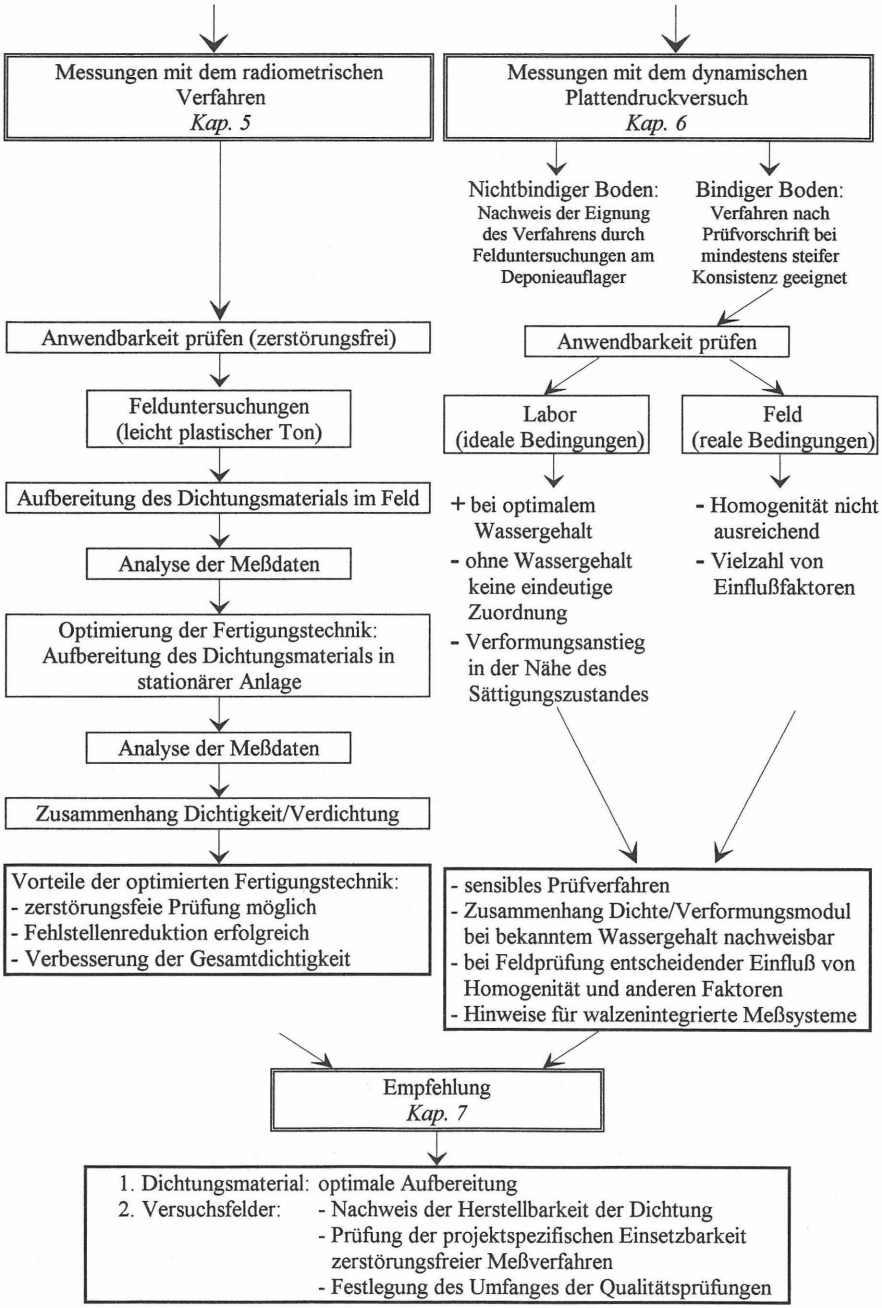
↓

Zerstörungsfreie Meßverfahren
Kap. 4

↓

	radiometrisch		statisch		dynamisch	
Kriterium	Wasser-gehalt	Dichte	Wasser-gehalt	Verformung	Wasser-gehalt	Verformung
"zerstörungsfrei"	+	+ Aufsetzsonde - Einstichsonde (Regelfall)	/	+ eigentliche Messung - Befahrung	/	+
"schnell bzw. flächendeckend"	+	+	/	-	/	+

↓ ↓


Messungen mit dem radiometrischen Verfahren
Kap. 5
Messungen mit dem dynamischen Plattendruckversuch
Kap. 6
Nichtbindiger Boden:
Nachweis der Eignung des Verfahrens durch Felduntersuchungen am Deponieauflager
Bindiger Boden:
Verfahren nach Prüfvorschrift bei mindestens steifer Konsistenz geeignet
Anwendbarkeit prüfen (zerstörungsfrei)
Anwendbarkeit prüfen
Felduntersuchungen (leicht plastischer Ton)
Labor (ideale Bedingungen)
Feld (reale Bedingungen)
Aufbereitung des Dichtungsmaterials im Feld
+ bei optimalem Wassergehalt
- ohne Wassergehalt keine eindeutige Zuordnung
- Verformungsanstieg in der Nähe des Sättigungszustandes
- Homogenität nicht ausreichend
- Vielzahl von Einflußfaktoren
Analyse der Meßdaten
Optimierung der Fertigungstechnik: Aufbereitung des Dichtungsmaterials in stationärer Anlage
Analyse der Meßdaten
Zusammenhang Dichtigkeit/Verdichtung
Vorteile der optimierten Fertigungstechnik:
- zerstörungsfeie Prüfung möglich
- Fehlstellenreduktion erfolgreich
- Verbesserung der Gesamtdichtigkeit
- sensibles Prüfverfahren
- Zusammenhang Dichte/Verformungsmodul bei bekanntem Wassergehalt nachweisbar
- bei Feldprüfung entscheidender Einfluß von Homogenität und anderen Faktoren
- Hinweise für walzenintegrierte Meßsysteme
Empfehlung
Kap. 7
1. Dichtungsmaterial: optimale Aufbereitung
2. Versuchsfelder:
- Nachweis der Herstellbarkeit der Dichtung
- Prüfung der projektspezifischen Einsetzbarkeit zerstörungsfreier Meßverfahren
- Festlegung des Umfanges der Qualitätsprüfungen

Der Anwendbarkeit des dynamischen Plattendruckversuches ist für verschiedene, im Zusammenhang mit Dichtungsbaumaßnahmen relevante Bodenarten untersucht worden. Das Prüfverfahren erweist sich bei nichtbindigen Auflagern für mineralische Dichtungen je nach örtlichen Randbedingungen, besonders der Gleichmäßigkeit des Bodenmaterials, als sinnvolle netzverdichtende Zusatzuntersuchung.

Bei Prüfungen auf gemischt- oder feinkörnigen Materialien führt die hohe Sensibilität des Prüfverfahrens im Regelfall nicht zu den gewünschten Genauigkeiten. Die Untersuchungen unter idealen Labor- und realen Feldbedingungen zeigen, daß trotz Einhaltung der Versuchsrandbedingungen nach TP BF-StB, Teil B 8.3 aufgrund des Einflusses einer Vielzahl lokalspezifischer Randbedingungen objektive zerstörungsfreie Prüfungen mit aussagekräftigen Ergebnissen nicht zu garantieren sind.

Für eine Qualitätsbewertung muß in jedem Fall der Wassergehalt, über den mit diesem Meßverfahren keine Aussage getroffen werden kann, bekannt sein. Liegt der Wassergehalt in der Größenordnung des optimalen Wassergehaltes, so ist eine Differenzierung nach der Güte des Verdichtungszustandes am ehesten möglich. Dabei belegen auch diese Ergebnisse, analog zu den Untersuchungen mit dem radiometrischen Verfahren, den entscheidenden positiven Einfluß einer möglichst optimalen Homogenität des Dichtungsmaterials auf die Anwendbarkeit zerstörungsfreier Meßverfahren. Die entsprechenden Nachweise sind in jedem Fall material- und projektspezifisch zu erbringen.

Die theoretischen Betrachtungen und die praktischen Messungen mit beiden Verfahren kommen somit übereinstimmend zu dem Ergebnis, daß die Güte der zerstörungsfreien (wie auch der zerstörenden) Qualitätsprüfung insgesamt unmittelbar von der Güte der Aufbereitung des Dichtungsmaterials abhängig ist. Aufgrund der Übertragbarkeit dieses Sachverhaltes auf vollständig flächendeckende Prüfungen ist davon auszugehen, daß auch bei Gütekontrollen mit walzenintegrierten Meßsystemen entscheidende Verbesserungen, in erster Linie das Auflösungsvermögen und damit die Aussagekräftigkeit betreffend, durch optimale Aufbereitungstechniken zu erzielen sind.

Die insgesamt erreichbare Qualität einer eingebauten Dichtungsschicht ist in Abhängigkeit von der Qualität der Aufbereitung bzw. den Homogenitätseigenschaften des Dichtungsmaterials vor dem Verdichtungsprozeß und dem Einfluß der Qualitätsprüfung in Bild 69 dargestellt (Qualitätstrompete). Die Qualität der Aufbereitung wird von links, ungünstigster Fall, über eine Mindestqualität nach rechts, Idealfall, als zunehmend angesetzt. Im Idealfall der Aufbereitung, hier befindet sich grafisch der kürzeste Abstand zum Erreichen der geforderten Soll-Qualität (= Mindestqualität), genügt seitens der Überwachungsorgane im Prinzip nur noch die

Kontrolle der Anzahl der Walzenübergänge und der Walzengeschwindigkeit gemäß den in den Versuchsfeldern gewonnenen Erkenntnissen. Damit kann die geforderte Soll-Qualität der eingebauten Dichtschicht mühelos und sogar die optimale Soll-Qualität mit insgesamt minimalem Prüfaufwand erreicht werden. Im ungünstigsten Fall der Aufbereitungsqualität ergibt sich zwar ein den Umfang der Qualitätsprüfung betreffenden großer Spielraum (Stichwort: weitestgehend flächendeckende Kontrolle), die geforderte Soll-Qualität ist jedoch, bezogen auf die gesamte Dichtungsfläche, realistisch betrachtet nicht einhaltbar.

Der Praxisfall liegt i.d.R. zwischen den Extremfällen. Bei Erreichen einer Mindestqualität der Aufbereitung kann kann bei zielgerichteter, von einer geotechnischen Fachkraft durchgeführten Qualitätsprüfung die geforderte Qualität erreicht werden.

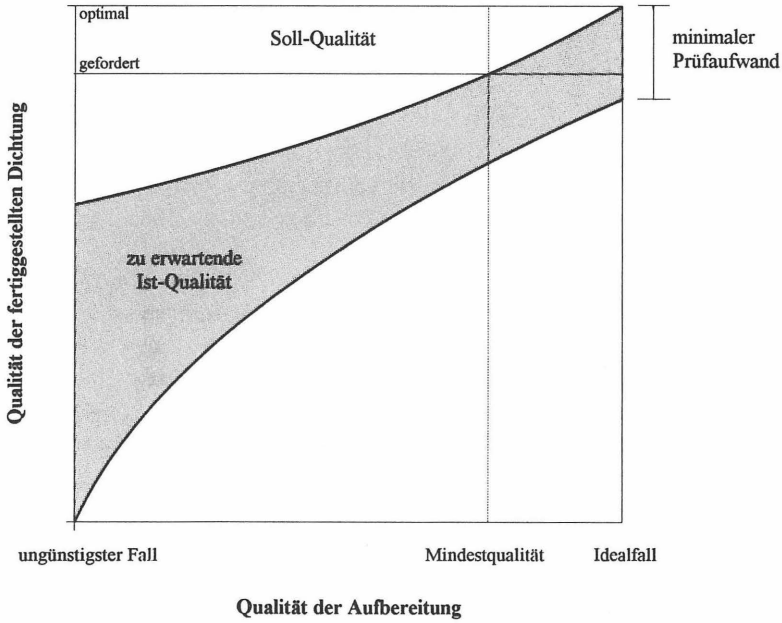


Bild 69: Erreichbare Dichtungsqualität in Abhängigkeit von Qualität der Aufbereitung und dem Einfluß der Qualitätsprüfung

Zusammenfassend wird festgestellt: Die Güte der Qualitätsüberwachung und damit letztlich der Qualität der Gesamtdichtung ist direkt proportional zur Güte der Aufbereitung oder anders ausgedrückt, entscheidend ist die Optimierung der Materialaufbereitung. Je besser die Materialaufbereitung ist, desto einfacher und sicherer sind die Qualitätsprüfungen, desto weniger sind sie aber auch erforderlich. In diesem Zusammenhang muß die Bedeutung des Versuchsfeldes bzw. der Versuchsfelder nachdrücklich hervorgehoben werden. Dem teilweise verbreiteten Gedankengut, diese Arbeit sei uneffektiv und spätestens in einem halben Tag erledigt, muß im Regelfall entschieden widersprochen werden, da hier die Weichen für eine erfolgreiche Bauleistung gestellt werden. Die Einsetzbarkeit zerstörungsfreier Meßverfahren sollte dabei projektspezifisch gepüft werden.

LITERATURVERZEICHNIS

ALI, N.A.; KHOSLA N.P. (1987):
Determination of Layer Moduli Using a Falling Weight Deflectometer
Transportation Research Record 1117, 1987, pp. 1 - 10

BECKEDAHL, H. (1990):
Prüfung von Verdichtung und Tragfähigkeit auf der Baustelle -
neue Entwicklung bei den Prüfverfahren
Straße und Autobahn, 1990, Heft Nr. 4, S. 148 - 151

BEHR, H. (1988):
Hinweise zur Kalibrierung von Strahlensonden für Dichte- und
Wassergehaltsmessungen im Straßenbau
Straße und Autobahn, 1988, Heft 3, S. 93 - 98

BEHR, H. (1986):
Entwicklung eines Schnellverfahrens zur Bestimmung des
Verformungsmoduls von Böden
26. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenwesen,
Bundesanstalt für Straßenwesen, 1986, S. 9 - 16

BOHN, A. (1968):
Tragfähigkeitsmessungen mittels Fallgerät
Straße und Autobahn, 1968, Heft 1, S. 17 - 24

BRÄCKELMANN, H.; HEMKER, O. (1993):
Erweiterung der Deponie Sprendlingen -
Planung und Qualitätssicherung der mineralischen Dichtung
Müll und Abfall, 25. Jahrgang, Heft 12, S. 910 - 917

DAHMS, E. (1992):
Qualitätssicherung bei mineralischen Deponieabdichtungen und
künstlichen mineralischen Barrieren
Vortrag Haus der Technik, Essen, 11.03.1992

DASTICH, I. (1992):
Theoretische und meßtechnische Untersuchungsergebnisse zum
Spannungs-Verformungsverhalten von Lockergesteinen und ungebundenen
Straßenbaustoffen
TU Dresden, Institut Stadtbauwesen und Verkehr,
Straßentest Kundeninformation, 1992

EHRLER, C. (1989):
Ein schnelles und sicheres Verfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit
Die Asphaltstraße, 1/89, S. 24 - 28

EHRLER, C. (1984):
Experimentelle Erfassung der Beanspruchung ungebundener Konstruktionsschichten durch den Verkehr
Die Straße, 24. Jahrgang, 1984, Heft 4, S. 116 - 123

EHRLER, C. (1983):
Durchführung und Auswertung von Verformungsmessungen auf ungebundenen Konstruktionsschichten (Plattendruckversuch)
Die Straße, 23. Jahrgang, 1983, Heft 11, S. 338 - 344

EHRLER, C. (1980):
Elastische Tragfähigkeitskennwerte ungebundener Straßenbaustoffe
Die Straße, 20. Jahrgang, 1980, Heft 10, S. 342 - 348

EHRLER, C. (1980):
Versuchstechnik eines neuen Verfahrens zur Bestimmung des E-Moduls von Straßenbaustoffen (Eigenschwingverfahren)
Die Straße, 20. Jahrgang, 1980, Heft 7, S. 240 - 242

EHRLER, C. (1978):
Grundzüge eines Verfahrens zur Bestimmung des E-Moduls von Straßenbaustoffen
Die Straße, 18. Jahrgang, 1978, Heft 4, S. 115 - 117

FERNE, B.W. (1990):
Comparative Trials of Falling Weight Deflectometer Systems in Use in the United Kingdom
Third International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields
Trondheim, Norway, July 1990, pp. 113 - 126

FLOSS, R.; KUDLA, W. (1990):
Erprobung des dynamischen Fallplattenversuches als Schnellprüfverfahren für die Qualitätssicherung im Erdbau und für ungebundene Tragschichten
Forschungsvorhaben FE-Nr. 05.087 G 87 C, München, Juni 1990

FLOSS, R.; KUDLA, W. (1989):
Qualitätsprüfungen für die Bodenverdichtung auf statistischer Grundlage
Straße und Autobahn, 1989, Heft 6, S. 217 - 224

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (1993):
Vergleichsuntersuchungen Leichtes Fallgewichtsgerät
Erläuterung der Untersuchungen, Mitteilung vom Juni 1993

GRABE, J. (1992):
Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle
Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 124, 1992

HORVLI, I.; FAKSDAL, I. (1990):
Correlation Studies with FWD, Dynaflect and Benkelman Beam
Third International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields
Trondheim, Norway, July 1990, pp. 149 - 159

JORDAN, K. (1974):
Zur Bestimmung einer dynamischen Tragfähigkeitskennzahl an Straßenkonstruktionsschichten geringer Tragfähigkeit
Die Straße, 14. Jahrgang 1974, Heft 3, S. 118 - 122

KNÜPFER, J. (1990):
Schnellverfahren für die Güteüberwachung mineralischer Deponiebasisabdichtungen
Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik,
Technische Universität Braunschweig, Heft Nr. 32, 1990

KRISTIANSEN, J.; PEDERSEN, J.P.; JØRGENSEN, E.V. (1990):
External Reference Measuring System for Accurate Control of FWD Measuring Results
Third International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields
Trondheim, Norway, July 1990, pp. 127 - 137

KUDLA, W. (1990):
Beitrag zur statistischen Qualitätskontrolle im Erdbau
Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München, Schriftenreihe Heft 16, 1990

KUDLA, W.; FLOSS, R.; TRAUTMANN, C. (1991):
Dynamischer Plattendruckversuch - Schnellprüfverfahren für die Qualitätssicherung von ungebundenen Schichten
Straße und Autobahn 42 (1991), Nr. 2, S. 66 - 71

LANGER, W. (1991):
Flächendeckende Verdichtungskontrolle
Straßen- und Tiefbau, 45. Jahrgang, Heft 6, S. 27 - 38

LARSEN, T.J. (1990):
Test Procedure for Rigid Pavements Using Falling Weight Deflectometer
Third International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields
Trondheim, Norway, July 1990, pp. 139 - 147

MARCHIONNA, A.; CESARINI, M.; FORNACI, M.G.; MALGARINI, M. (1985):
Pavement Elastic Characteristics Measured by Means of Tests Conducted with the Falling Weight Deflectometer
Transportation Research Record 1007, 1985, pp. 46 - 53

NAZARIAN, S.; BRIGGS, R.C. (1990):
Determination of Structural Integrity of Secondary Roads Using Falling Weight Deflectometer Device
Third International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields
Trondheim, Norway, July 1990, pp. 161 - 170

SAMARAS, S.; LAMM, R. (1990):
Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK)
Straßen- und Tiefbau, 44. Jahrgang, Heft 6, S. 13 - 21

SCHULTE, W. (1971):
Zur Ermittlung und Beurteilung von Benkelman-Einsenkungsmeßwerten
Straße und Autobahn, 1971, Heft 3, S. 104 - 110

SCHULZ, H. (1987):
Mineralische Dichtungen für Wasserstraßen
Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik,
Technische Universität Braunschweig, Heft Nr. 23, 1987

SMITH, R.B. (1985):
Preliminary Evaluation of the Dynatest 8000 Falling Weight Deflectometer
Australian Road Research, 15(4), December 1985, pp. 229 - 238

TRISCHLER, J.; ERHARDT, T. (1985):
Bestimmung von Dichte und natürlichem Wassergehalt:
Das radiometrische Meßverfahren
Tiefbau - Ingenieurbau - Straßenbau, 1985, Heft 6, S. 347 - 350

VON KLITZING, E. (1986):
Zerstörungsfreie Dicken- und Dichtemessungen an Asphaltbefestigungen
Die Asphaltstraße, 4/86, S. 206 - 217

WEILAND, G. (1988):
Qualitätskontrolle im Straßenbau
Zerstörungsfreie Materialuntersuchung mit radiometrischen Sonden
Baumaschinendienst, 1988, Heft 5, S. 386 - 389 und
Baumaschinendienst, 1988, Heft 6, S. 430 - 434

WEINGART, W. (1991):
Bestimmung des dynamischen Verformungsmoduls
mit dem Leichten Fallgerät
31. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenwesen,
Bundesanstalt für Straßenwesen, 1991, S. 78 - 90

WEINGART, W. (1981):
Probleme der dynamischen Tragfähigkeitsprüfung mit Fallgeräten
Die Straße, 21. Jahrgang, Heft 11, S. 369 - 373

WELLNER, F.; QUECK, U. (1989):
Rechnerische Erfassung des Spannungs-Verformungsverhaltens
ungebundener Straßenbaustoffe
Die Straße, 29. Jahrgang, 1989, Nr. 11, S. 332 - 335

WELLNER, F. (1988):
Der Plattendruckversuch auf ungebundenen Straßenkonstruktionen und
Schichten
Die Straße, 28. Jahrgang, 1988, Nr. 6, S. 180 - 182

WELLNER, F. (1984):
Konstruktive Probleme bei Pflasterbestigungen auf gebundenen und
ungebundenen Tragschichten
Die Straße, 24. Jahrgang, 1984, Nr. 2, S. 48 - 52 und
Die Straße, 24. Jahrgang, 1984, Nr. 3, S. 67 - 71

WINKELVOSS, U. (1985):
Zwei neuartige dynamische Prüfverfahren zur Qualitätssicherung im Erdbau
Baumaschine und Bautechnik, 1985, Heft 9, S. 338 - 341

ZELLER, J.; SCHNELLER, A. (1957):
Einige bodenmechanische Eigenschaften künstlich verdichteter Lockergesteine
Straße und Verkehr, 43. Jahrgang, Heft Nr. 13, Dezember 1957

Firmen

BOMAG (1992):
Terrameter BTM 04 - Meßtechnik für die Verdichtungskontrolle
BOMAG, Boppard/Rhein

RATIONALISIERUNGSGESELLSCHAFT LEITUNGSTIEFBAU MBH (1991):
Bedienungsanleitung und Arbeitsanweisung für die Anwendung des dynamischen Plattendruckgerätes; Vorläufige Zuordnung der Verformungsmoduln E_v und E_{vd}
Düsseldorf, August 1991

SIEBERTZ ELECTRONIC (1993):
Kalibrierung der Belastungsvorrichtung und der Setzungsmeßeinrichtung: Prüfprotokolle
Siebertz Electronic, Wesel, März 1993

STRASSENTEST:
EMUD-3 von SRASSENTEST
Das Eigenschwingungs-Verfahren zur Bestimmung der Boden-Tragfähigkeit und des Schicht-Moduls gebundener Decken
Straßentest GmbH, Alzenau

TROXLER (1991):
Leitfaden für die Umgangs- und Transportgenehmigung nach Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) und Gefahrgutverordnung Straße (GGVS)
Troxler Electronics GmbH, Alling, Oktober 1991

TROXLER (1985):
Surface Moisture-Density Gauges, 3400-B Series, Instruction Manual
Troxler Electronic Laboratories, Inc. and subsidiary Troxler International, LTD., North Carolina, USA

Normen

DIN 4021	1990	Baugrund; Aufschluß durch Schürfe und Bohrungen sowie Entnahme von Proben
DIN 18121 T1	1976	Baugrund; Untersuchung von Bodenproben; Wassergehalt, Bestimmung durch Ofentrocknung
DIN 18121 T2	1989	Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Wassergehalt, Bestimmung durch Schnellverfahren
DIN 18122 T1	1976	Baugrund; Untersuchung von Bodenproben; Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen), Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze
DIN 18123	1983	Baugrund; Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung der Korngrößenverteilung
DIN 18124	1989	Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Bestimmung der Korndichte Kapillarpyknometer - Weithalspyknometer
DIN 18125 T2	1986	Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Bestimmung der Dichte des Bodens, Feldversuche
DIN 18127	1993	Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Proctorversuch
DIN 18128	1990	Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Bestimmung des Glühverlusts
DIN 18129	1990	Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Kalkgehaltsbestimmung
DIN 18130	1989	Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts, Laborversuche
DIN 18134	1993	Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Plattendruckversuch
DIN 18196	1988	Erd- und Grundbau; Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke
DIN 55302	1970	Statistische Auswertungsverfahren; Häufigkeitsverteilung, Mittelwert und Streuung; Grundbegriffe und allgemeine Rechenverfahren
DIN 55350 T11	1987	Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Grundbegriffe der Qualitätssicherung

Regelwerke

[1] Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu Abfallgesetz (TA Abfall)
Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen in der ab 1. April 1991 geltenden Fassung

[2] Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall)
Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen, 1993

[3] Durchführung des Abfallgesetzes; Abdichtung von Deponien für Siedlungsabfälle
RdErl. d. MU v. 24.06.1988 - 207-62812/21 -, - GültL 30/36 -
Nds. MBl. Nr. 22/1988

[4] Durchführung des Abfallgesetzes; Anforderungen an Deponiestandorte für Siedlungsabfälle
RdErl. d. MU v. 27.11.1991 - 504-62812/21 B -, - GültL 30/56 -
Nds. MBl. Nr. 3/1992

[5] Mineralische Deponieabdichtungen - Richtlinie -
Landesamt für Wasser und Abfall NRW, August 1993

[6] Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" - GDA
Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau, 1993

[7] Empfehlungen zur Herstellung einer künstlichen mineralischen Barriere bei Deponien
Anforderungen an Material, Einbau und Prüfung
Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung NLfB, März 1992

[8] Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" - Häfen und Wasserstraßen
EAU 1990
Arbeitsausschuß "Ufereinfassungen" der Hafenbautechnischen Gesellschaft e.V. und der Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V.

[9] TGL 11461/10, Baugrundmechanik, Prüfungen im Feld;
Bestimmung des dynamischen Verformungsmoduls mit dem leichten Fallgerät
Deutsche Demokratische Republik, Oktober 1980

[10] Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau
ZTVE-StB 76, Bundesminister für Verkehr, Fassung 1978

[11] Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau TP BF-StB, Teil B 4.3
Anwendung radiometrischer Verfahren zur Bestimmung der Dichte und des Wassergehaltes von Böden
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen,
Arbeitsgruppe "Erd- und Grundbau", Ausgabe 1988

[12] Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau TP BF-StB, Teil B 8.3
Dynamischer Plattendruckversuch mit Hilfe des Leichten Fallgewichtsgerätes
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen,
Arbeitsgruppe "Erd- und Grundbau", Ausgabe 1992

[13] Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau TP BF-StB, Teil B 9.1
Einsatz des Benkelman-Balkens für die Erdbaukontrolle
BAST-Empfehlungen BAST-E7, Fassung Juli 1984

[14] Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau TP BF-StB, Teil B 9.3
Prüfung der Gleichmäßigkeit der Verformbarkeit von Böden
mit dem Befahrungsversuch und dem Benkelman-Balken
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen,
Arbeitsgruppe "Erd- und Grundbau", Ausgabe 1988

[15] Merkblatt über flächendeckende dynamische Verfahren
zur Prüfung der Verdichtung im Erdbau
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen,
Arbeitsgruppe "Erd- und Grundbau", Ausgabe 1993

[16] Merkblatt über Einsenkungsmessungen mit dem Benkelman-Balken
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen,
Arbeitsgruppe "Fahrzeug und Fahrbahn", Ausgabe 1991

[17] Dichtungselemente im Wasserbau
DVWK-Merkblatt 215/1990

SYNOPSIS

Non-destructive tests for the quality assessment of mineral liners

Mineral liners are decisive components for the long-term safety and reliability of modern landfill sites and hydraulic structures. Comprehensive quality control schemes beginning on project planning and following through to implementation have to ensure a successful construction.

The most essential criterion for the quality assessment of a built-in liner is its permeability; and it is of particular importance that the demands made on the liner are met on the entire site. Even small defective spots, i.e. on-site zones having a higher permeability, are already sufficient to cause major drawbacks with regard to the overall quality of a liner section (picture 1, pg. 14: effects of defective spots on the permeability of the overall area).

For a successful building performance and rapid progress of construction work non-destructive and rapid determination of the permeability - covering, whenever possible, the overall area - is of major importance. However, permeability tests can only be made on a few specimen taken from a large-meshed grid on the overall area of the completed liner (table 1c, pg. 8: demands on the quality control of built-in liners for landfill base and surface sealings) and may take several weeks for completion. For this reason the material parameters "moisture content" and "density" are used for the quality assessment of the built-in liner. These are characteristic values that can be determined for small, isolated spots while construction work is still in progress. Compliance with the required permeability limits can be estimated for the overall area through a correlation applicable to the specimen that has been established both in the laboratory and in the test fields, and also through visual inspection during the construction of the liner.

Soil samples, according to DIN 18125 part 2, in conjunction with a flash drying process in a microwave oven, according to DIN 18121 part 2, are commonly used as a test method for the parameters moisture content and density (table 1c, pg. 8). This method has several disadvantages: it is destructive, does not cover the overall area and is relatively time consuming.

The use of radiometric test methods (picture 5, pg. 26: combined contact and penetration probe with gamma-ray and neutron emitter) is also generally accepted; however, this method fulfils the criterion "non-destructive" only for the determination of the moisture content.

Destructive testing is in general used for the determination of density because insertion of the radiation source into the mineral liner about to be examined is through a hole that has to be cut into the liner. Compared to the method using soil samples according to DIN 18125 part 2 the

time required for testing is here considerably reduced. Several tests can therefore be carried out within a given period of time so that there is consequently a tendency towards a quality assessment covering the overall area.

Aim of this paper is the analysis and proposal of potential applications for non-destructive test methods that are of practical use in construction work and are not very time consuming so that they cover the overall area as completely as possible.

Overview of non-destructive test methods

The radiometric test method can be used as genuine non-destructive test in which density measurements are made in a zone close to the surface.

Static test methods, such as plate bearing test, Benkelman beam test or rolling load test, are not appropriate because the equipment and personnel requirements involved are extreme and the time needed for testing is too much increased to ensure rapid progress of liner construction. Moreover, if conventional machinery is used for the compaction of the mineral soil material, even layer surfaces within a liner package cannot be obtained so that a good fitness of the formation for traffic passage is not available although it is required for Benkelman beam testing and rolling load testing.

Like static test methods dynamic test methods cannot be used to determine the moisture content. If the falling weight deflectometer (picture 8, pg. 32: working principle of the falling weight deflectometer) or the Eigen vibration method (picture 9, pg. 33: working principle of the Eigen vibration method) is used, the great number of test devices and evaluation procedures represents a considerable disadvantage. A standardised test procedure (TP BF-StB, part B 8.3, 1992 edition) is only available for the dynamic plate bearing test with a light falling weight (picture 10, pg. 36: elementary diagram of the light falling weight apparatus), which, however, has so far been used primarily for testing cohesionless materials. Since then intensive work has been carried out to establish the correlation between the dynamic modulus of deformation and the degree of compaction and to specify limits.

In the following, experimental part of this paper examinations based on radiometric testing and dynamic plate bearing testing will be discussed.

Radiometric testing

During placement of a slightly plastic clay as the base sealing of a household refuse landfill (overall area approx. 4.3 ha) 1,200 measurements were made by non-destructive and conventional destructive radiometric testing.

A combined contact and penetration probe (type 3411-B from Troxler Electronics GmbH, North Carolina) was used as the test apparatus. For the determination of the moisture content a stationary neutron source - Americium-241-Beryllium with an activity of 1,480 MBq (40 mCi) - was attached to the bottom of the probe. For the determination of the density a gamma-ray source - Caesium 137 with an activity of 296 MBq (8 mCi) - was attached to the tip of the emitter rod.

As the processing of the liner material has a decisive effect on the measured values and also on the feasibility of non-destructive testing, two stages of the building project have to be distinguished. In the first stage the material was processed in the field, whereas in the second stage processing took place in a stationary processing plant. The characteristic values of the liner material (table 15, pg. 48: characteristics of the mineral liner material) as well as the personnel and the testing methodology as part of the quality assessment were identical.

Evaluation of the moisture content tests

When the material was processed in the field, a relatively wide straying of the measured values could be observed (picture 16, pg. 52: frequency distribution of the moisture contents). The resulting problem is twofold: on the one hand the exact and constant dosing of the water feed on the overall area, on the other hand areas of local water accumulation or local water deficiency that can never be excluded - e.g. in and beside wheel tracks. Extreme weather conditions, substantial changes in the daily temperatures and sudden precipitation could be noted as additional difficulty.

The markedly lower straying of the measured values for stationary processing as compared to field processing can be explained with the improved processing and placement procedure (picture 22, pg. 60: frequency distribution of the moisture contents). The liner material is evenly moistened on the overall area and during spreading and compaction only temporarily subjected to the prevailing weather conditions.

Evaluation of the density tests

Density tests were carried out on the field-processed material in a depth of 10 and 25 cm. In a depth of 25 cm the span of the dry densities was noticeably increased (pictures 19 and 20, pg. 55: frequency distribution of the dry densities for test depth t = 10 cm and t = 25 cm). At approx. 80% of the measuring points the degree of compaction was lower than that measured at a depth of t = 10 cm (picture 21, pg. 56: frequency distribution of the differences between the degrees of compaction for test depth t = 25 cm and t = 10 cm). Because of the extremely irregular density distribution within a single liner layer, density tests made exclusively on the basis of non-destructive test methods would not be very meaningful.

In this regard considerable improvement could be made through an optimised processing technology (stationary processing plant). Density tests were carried out in a depth of 5 cm and 25 cm. As the layer surfaces were anyway slightly broken up with a rotary cultivator to obtain better mesh, the tests in a depth of 5 cm can be considered as non-destructive. The frequency distribution of the dry densities shows for both test depths a good consistency (pictures 24 and 25, pg. 63: frequency distribution of the dry densities at a depth of t = 5 cm and t = 25 cm). All measured values fulfil the demands on the degree of compaction of D_{Pr} = 95%. At only 1.5% of the measuring points a reduction of the degree of compaction by at least 3% could be observed in the greater depth (picture 26, pg. 64: frequency distribution of the differences between the degrees of compaction for test depth t = 25 cm and t = 5 cm) - for field-processed material this percentage was markedly increased (13%).

The causes for a noticeable lower degree of compaction in greater depth at a few measuring points could be detected. These measuring points had a relatively low moisture content, i.e. very near to the Proctor moisture content or slightly above (picture 30, pg. 67: average and standard deviation as a function of the moisture content).

Conclusion

A moisture content of at least approx. 1% above the optimum moisture content has a positive effect on the desired even density distribution over the entire liner layer. Through the use of a stationary processing plant the moisture content can be reliably controlled while construction work is progressing. Therefore, if a non-destructive density test in a zone near the layer surface gives a result that meets the requirements, it can be expected that an equally good or at least an acceptable result will be obtained in greater depth. Should it be necessary, a safety margin has to be defined. If the desired degree of compaction cannot be obtained, a destructive test method has to be used in addition.

Dynamic plate bearing testing

The test device consists of the following components (picture 10, pg. 36: elementary diagram of the light falling weight apparatus):

- stiff circular load plate
- settlement reference marker assembly in the middle of the load plate (geophone)
- load assembly (falling weight, guide rod, spring buffer).

For the tests the load plate had to be placed on the surface of the soil about to be examined in such a way that no cavity was formed at the soil-plate interface. The falling weight was released at a height determined by calibration and intercepted after hitting the plate. Maximum sinking of the load plate was calculated by integrating the gradient of the oscillation wave. After three initial pre-load impacts for establishing a close contact between load plate and soil, three test impacts took place. The dynamic modulus of deformation E_{vd} is inversely proportional to the average of the measured settlement amplitudes and gives a measure for the plasticity of the soil under defined vertical impact load.

Examination of a frictional landfill surface liner

The test method has been proven on verification of the proper compaction of a frictional formation (picture 36, pg. 75: straying of the grading curve of the sub-surface mineral) serving as the artificial mineral barrier for the extension of a household refuse landfill. A comparison of the dynamic modulus of deformation with the dry density, which was determined by the method using soil samples (picture 37, pg. 76: test arrangement at the measuring points), showed a good correlation (picture 38, pg. 77: correlation between dry density and dynamic modulus of deformation).

Laboratory examination of a mixed-grained soil material under ideal conditions

A test stand has been developed in the laboratory. This stand can be used to investigate the essential correlation between moisture content/density and modulus of deformation under reproducible, ideal conditions (picture 42, pg. 83: test pots d= 100 cm and d = 45 cm). Preliminary trials aiming at producing test specimens of a constant density have shown that optimum results can be obtained provided the sealing material is placed in thin layers and then compacted with percussion tools - a procedure based on the Proctor test. Following the production of a test specimen the dynamic plate bearing test can be started.

A sand-clay mixture, which was used for building the artificial mineral barrier (3-m thickness) as part of the extension work on a household refuse landfill, served as the test soil (picture 39, pg. 80: grading curve of the test soil; picture 40, pg. 81: plasticity diagram of the test soil; picture 41, pg. 81: Proctor curve of the test soil).

Examples for the results of the settlement amplitudes depending on the number of an impact in a series of impactions are given in picture 54 (pg. 96 top: settlement amplitudes for $w_{Pr} = 0.148 \leq w \leq 0.155$). After initially high settlement amplitudes a reduction up to consistency could be observed. For a lower dry density a greater number of impacts, i.e. increased compaction work, is necessary to reach this state. On the whole it can be said that a higher dry density results in lower settlement amplitudes because due to its higher rigidity the soil has a stronger resistance to the sinking of the load plate.

Picture 49 shows the correlation between dynamic modulus of deformation, moisture content and dry density (pg. 90: E_{vd} [MN/m^2] according to TP BF - StB). For moisture contents between the optimum moisture content $w_{Pr} = 0.148$ and $w = 0.155$ the dynamic modulus of deformation increases on increasing dry density. Only at a high saturation value can higher deformations be observed again. Consequence: If the required degree of compaction is $D_{Pr} = 95\%$, an obtained test result of $E_{vd} > 39$ MN/m^2 can be considered as adequate. Otherwise the evaluation of the result would not be safe and an additional destructive test would be required. A similar procedure can be used for the other moisture content ranges.

To obtain an example for the effects on the test results, the dried surface of the test soil was examined after three hours' drying at different temperatures (picture 62, pg. 106: settlement amplitudes in dependence of the surface temperature).

Field trails on mineral liners

Through examinations of a clay material (picture 64, pg. 110: grading curve; picture 65, pg. 111: Proctor curve) the tendencies observed in the laboratory could be affirmed in principle (picture 66, pg. 112: correlation between moisture content, dry density and dynamic modulus of deformation). However, compared to the laboratory experiments, which were performed under ideal conditions - only moisture content and density variable, the in-situ trials were marked by the presence of a superimposition of several effects that could not be quantified separately:

- inhomogeneities in the liner material

- principle of compaction (vibration method - weight dropping method)

- density differences over the liner layer
- period of time between the end of compaction work and the start of testing
- surface changes due to the effects of weather
- effects of the test on deeper layers.

Conclusion

In view of the great demand for efficient, flawless mineral sealing layers for landfill sites and hydraulic structures it is of major interest to develop meaningful, narrow-meshed (in the ideal case completely covering the overall area), non-destructive test methods for the assessment of the density quality.

The dynamic plate bearing test is suitable for testing frictional landfill surface liners. In testing mixed-grained and fine-grained sealing materials the efficiency of this test method is negatively influenced by specific local boundary conditions and also by the fact that the moisture content has to be determined in addition.

The great advantage of the radiometric test method is that both building parameters - moisture content and density - can be determined at the same time, and that the test of the moisture content is always non-destructive. Density can also be appropriately determined in non-destructive testing provided the density is sufficiently equal over the entire liner layer. Suggestions for the procedure to be followed in non-destructive quality tests have been worked out for a model project.

On the whole the great importance of

- material selection,
- material processing and
- test fields

has to be strongly emphasised because these options determine the course to be taken towards a successful construction on site, i.e. to ensure the absence of defective spots in and an evenly high density of the mineral liner.

IGB·TUBS

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 *
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

IGB·TUBS

Nr. 11	Papakyriakopoulos	Verhalten von Erd- und Steinschüttdämmen 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 in Braunschweig am 6. und 7. Februar 1985 *
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 in Braunschweig am 23. und 24. Oktober 1985
Nr. 20	Meseck, H.	Abdichten von Deponien, Altlasten und kontaminierten Standorten - Fachseminar in Braunschweig am 6. und 7. 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 in Braunschweig am 2. und 3. 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
Nr. 28	Geil, M.	Untersuchungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Bentonit-Zement-Suspensionen im frischen und erhärteten Zustand, 1989
Nr. 29	Kruse, T.	Standsicherheit von Kombinationsabdichtungen auf Deponieböschungen, 1989
Nr. 30	Rodatz, W. u.a.	Sonderheft zum 15jährigen Bestehen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, 1989

IGB·TUBS

Nr. 31	Rodatz, W. Beckefeld, P. Sehrbrock, U.	Standsicherheiten im Deponiebau / Schadstoffeinbindung durch Verfestigung von Abfällen - Fachseminar in Braunschweig am 19. und 20. März 1990
Nr. 32	Knüpfer, J.	Schnellverfahren für die Güteüberwachung mineralischer Deponiebasisabdichtungen, 1990
Nr. 33	Beckefeld, P.	Schadstoffaustrag aus abgebundenen Reststoffen der Rauchgasreinigung von Kraftwerken - Entwicklung eines Testverfahrens, 1991
Nr. 34	He, G.	Standsicherheitsberechnungen von Böschungen, 1991
Nr. 35	Rodatz, W. Sehrbrock, U.	Probenentnahme bei der Erkundung von Verdachtsflächen (Altlasten), Fachseminar in Braunschweig am 13. September 1991
Nr. 36	Kahl, M.	Primär- und Sekundärspannungszustände in überkonsolidiertem Ton - Am Beispiel eines im Hamburger Glimmerton aufgefahrenen Tiefdükers, Sissertation, 1991
Nr. 37	Rodatz, W. Hemker, O. Voigt, Th.	Standsicherheiten im Deponiebau, Fachseminar in Braunschweig am 30. und 31. März 1992
Nr. 38	Rodatz, W. Meier, K.	Dynamische Pfahltests, Fachseminar in Braun schweig am 21. und 22. Januar 1991
Nr. 39	Rösch, A.	Die Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit im Gelände - Entwicklung von Meßsystemen und Vergleich verschiedener Auswerteverfahren, 1992

Nr. 40	Sehrbrock, U.	Prüfung von Schutzlagen für Deponieabdichtungen aus Kunststoff, 1993
Nr. 41	Rodatz, W. Hartung, M. Wienholz, B.	Pfahl Symposium 1993 Fachseminar in Braunschweig am 18. und 19. März 1993
Nr. 42	Rodatz, W. Gattermann, J. Hartung, M.	IGB·TUBS Lexikon - Sammlung ca. 5500 technischer Ausdrücke in Deutsch, Englisch, Französisch und Spanisch - zusammengestellt in 4 Bänden, 1993
Nr. 43	Rodatz, W. Hemker, O. Horst, M. Kayser, J.	Geotechnische Probleme im Deponie- und Dichtwandbau - Fachseminar in Braunschweig am 17. und 18. März 1994
Nr. 44	Rodatz, W. Gattermann, J. Wienholz, B.	Messen in der Geotechnik Fachseminar in Braunschweig am 26. und 27. Mai 1994
Nr. 45	Hartung, M.	Einflüsse der Herstellung auf die Pfahltragfähigkeit in Sand, 1994
Nr. 46	Hemker, O.	Zerstörungsfreie Meßverfahren zur Qualitätsprüfung mineralischer Dichtungen, 1994
Nr. 47	Voigt, Th.	Frosteinwirkung auf mineralische Deponieabdichtungen, 1994
Nr. 48	Rodatz, W. Ernst, U. Wienholz, B.	Pfahl-Symposium 1995 Fachseminar in Braunschweig am 23. und 24. Februar 1995

* = vergriffen