

## E 3-2 Eignungsprüfung mineralischer Dichtwandmassen

Stand: Bautechnik 1999

### 1 Allgemeines

Die Empfehlung regelt die Eignungsprüfung für mineralische Dichtwandmassen, die für die vertikale Abdichtung von Deponien und Altlasten eingesetzt werden. Für die Qualitätssicherung gilt E 5-3. Sie gilt für alle Bauverfahren, bei denen der anstehende Boden verdrängt (z. B. Schmalwand) oder ausgehoben (z. B. Schlitzwand) und durch eine mineralische Dichtwandmasse ersetzt wird. Im wesentlichen sind es die folgenden Bauverfahren:

#### Schmalwand

Einrammen oder Einrütteln eines Stahlprofils. Beim Ziehen des Stahlprofils wird der freigegebene Hohlraum mit einer Dichtwandmasse unter Druck aufgefüllt.

#### Schlitzwand-Einphasenverfahren

Bodenaushub im Schutz einer erhärtenden Bentonit-Zement-Suspension, die im Schlitz verbleibt und langsam abbindet.

#### Schlitzwand-Zweiphasenverfahren

Bodenaushub im Schutz einer Bentonitsuspension, Einbau der Dichtwandmasse im Kontraktor-Verfahren bei gleichzeitigem Verdrängen der Bentonitsuspension.

Die Empfehlung gilt nicht für Verfahren, bei denen der Porenraum des anstehenden Bodens verringert bzw. mit einem Injektionsmaterial aufgefüllt wird.

Die Eignung mineralischer Dichtwandmassen ist in jedem Einzelfall durch Eignungsprüfungen nachzuweisen. Sie sollen nur von speziell hierfür ausgerüsteten und entsprechend sachkundigen Prüfinstituten vorgenommen werden. In der Regel ist folgendes zu bestimmen:

- Zusammensetzung und Eigenschaften der Ausgangsstoffe
- Eigenschaften der frischen Dichtwandmasse
- Verarbeitbarkeit und Erstarrungsverhalten der Dichtwandmasse
- Festigkeit und Spannungs-Verformungs-Verhalten der erhärteten Dichtwandmasse
- Durchlässigkeit der erhärteten Dichtwandmasse
- Dichte und Wassergehalt.

Zur stofflichen Kennzeichnung der Ausgangsstoffe findet der Wasseraufnahmeversuch nach DIN 18132 mit Normverweis [1] Anwendung. Darüber hinaus liefert der Wasseraufnahmeversuch an erhärteten Dichtwandproben

unterschiedlichen Alters statistische Prüfkriterien für die Beurteilung der mit der Zeit abnehmenden Durchlässigkeitsbeiwerte (s. auch E 5-3 und E 5-8).

Die in Eignungsversuchen festgestellten Eigenschaften der Dichtwandmasse sind auf der Baustelle durch die Qualitätssicherung entsprechend E 5-3 zu überprüfen.

Bei industriell hergestellten Dichtwand-Fertigmischungen (Trockenmischungen aus den in Abschnitt 2 genannten Komponenten) gleich bleibender Zusammensetzung, Eigenschaften und Bezeichnungen kann die für jeden Einzelfall geforderte Eignungsprüfung (Einzelfall-Eignungsprüfung) ersetzt werden durch eine einmalige Allgemeine Eignungsprüfung, welche nicht an den jeweiligen Baustelleneinsatz gebunden ist. Bei dieser Allgemeinen Eignungsprüfung werden durch ein sachkundiges Prüfinstitut die oben genannten Eigenschaften des Fertigproduktes für mehrere praxisrelevante Wasser-Feststoffverhältnisse ermittelt.

Spätestens zu Beginn einer Baumaßnahme ist auf der Baustelle ein Probeschlitz herzustellen und zu überprüfen, ob die in der Eignungsprüfung untersuchte Dichtwandmischung auch unter den gegebenen Baustellenbedingungen verarbeitbar ist. Hierbei ist insbesondere zu berücksichtigen:

- Schlitztiefe
- erforderliche Aushubdauer
- Höhenlage des Grundwasserspiegels
- Grundwasserinhaltsstoffe
- Wasserdurchlässigkeit des umgebenden Bodens.

## **2 Zusammensetzung und Herstellung der Dichtwandmasse sowie Probenherstellung**

Dichtwandmassen bestehen im Allgemeinen aus den Komponenten

- Bentonit
- hydraulisches Bindemittel
- mineralische Füllstoffe
- Wasser
- gegebenenfalls Zusatzmitteln.

Die Eigenschaften der Ausgangsstoffe müssen durch Prüfzeugnisse der Lieferfirma oder entsprechende Versuche des Instituts, das die Eignungsprüfung durchführt, nachgewiesen werden. Hierbei sind folgende Informationen von Bedeutung:

Bentonit

- Beschreibung nach DIN 4127
- Wasseraufnahme nach DIN 18 132
- Montmorillonitgehalt [2]

### Hydraulisches Bindemittel

- für Zement Angaben nach DIN 1164 Mineralische Füllstoffe
- bodenphysikalische Beschreibung (Kornform, Korngrößenverteilung, Gehalt an organischen Bestandteilen, Korndichte, Kalkgehalt, Wasseraufnahme, Wassergehalt)
- mineralogische und chemische Beschreibung

### Wasser

- Angaben nach DIN 4030 Zusatzmittel
- Art und Wirkungsweise des Stoffes
- Dichte
- Prüfzeugnisse.

Zur Beurteilung der Langzeitbeständigkeit von Dichtwand-Fertigmischungen gegenüber bestimmten Sickerwässern sind Angaben über die tonmineralogische Zusammensetzung der Massen erforderlich.

Die in der Eignungsprüfung verwendeten Ausgangsstoffe Bentonit und hydraulisches Bindemittel dürfen nicht älter als vier Wochen sein. Herstelldatum und Lieferwerk sind anzugeben.

Bei Dichtwand-Fertigmischungen setzt bereits unmittelbar nach dem Zusammenmischen der einzelnen Komponenten im trockenen Zustand während der Lagerung im Werk und auf der Baustelle eine gegenseitige Beeinflussung der Komponenten Bentonit und hydraulisches Bindemittel ein. Dieser Vorgang beeinflusst die Suspensionseigenschaften. Deshalb müssen die vom Hersteller angegebenen Zeiträume bis zur Herstellung der Dichtwandsuspension eingehalten werden; dieser Sachverhalt ist bei der allgemeinen Eignungsprüfung der Dichtwand-Fertigmischung zu berücksichtigen.

Die Zusammensetzung einer Dichtwandmasse wird aufgrund der Eignungsversuche festgelegt. Da bei mineralischen Dichtwandmassen häufig lokal verfügbare Materialien eingesetzt werden, müssen diese auch in den Eignungsversuchen berücksichtigt werden. Die bei der Bauausführung zu erwartende Feststoffanreicherung mit Aushubmaterial darf im Untersuchungsprogramm berücksichtigt werden.

Ist der anstehende Boden verunreinigt und kann die Verunreinigung die Eigenschaften der Stützflüssigkeit beeinflussen, muss die zu erwartende Feststoffanreicherung im Untersuchungsprogramm berücksichtigt werden. Vom geotechnischen Fachmann ist abzuschätzen, welcher Anteil des Bodenkorns beim Aushub der Lamellen in die Stützflüssigkeit bzw. Dichtwandmasse eingetragen werden kann.

Ist das anstehende Grundwasser verunreinigt und kann die Verunreinigung die Eigenschaften der Stützflüssigkeit bzw. Dichtwandmasse beeinflussen, so ist dies in

der Eignungsprüfung zu berücksichtigen. Hierzu ist das Anmachwasser für die Suspension in den zu erwartenden Anteilen bzw. Konzentrationen durch das unreinigte Grundwasser zu ersetzen. Der Anteil an Grundwasser, der beim Aushub in die Dichtwandmasse gelangt, ist vom geotechnischen Fachmann im Einzelfall abzuschätzen.

Die Zusammensetzung einer Dichtwandmasse ist grundsätzlich je Kubikmeter frischer Dichtwandmasse anzugeben (DIN 4126, Anhang B, Tab. 3 und 4).

Als Kurzbezeichnung sind die Stoffanteile in der Reihenfolge Bentonit/hydraulisches Bindemittel/mineralische Füllstoffe/Wasser in kg je Kubikmeter frischer Dichtwandmasse anzugeben, z. B. Mischung 40/200/100/880. Für die Herstellung der Dichtwandmasse im Labor ist zunächst der Bentonit nach DIN 4127 aufzubereiten und nach einer Quellzeit von 24 Stunden zu prüfen.

Der ausgequollenen Bentonitsuspension werden die Anteile an hydraulischem Bindemittel, mineralischen Füllstoffen und gegebenenfalls chemischen Zusatzmitteln in weiteren Mischvorgängen zugegeben, wobei die Reihenfolge einzuhalten ist, die für die Bauausführung vorgesehen ist. Dabei ist in der Regel eine Mischzeit von 5 Minuten bei 1200 Umdrehungen/min einzuhalten. Als Mischwerkzeug ist ein mehrflügeliger Turbopropeller zu verwenden. Die Abmessungen der Gefäße sind in Bild 3-2.1 angegeben.

Der Mischbehälter ist mit mindestens 15 l Dichtwandmasse zu füllen. An der so hergestellten Dichtwandmasse werden die Eigenschaften der frischen Dichtwandmasse nach Abschnitt 3 dieser Empfehlung geprüft. Die Prüfung erfolgt unmittelbar nach dem Mischen. Falls keine Erfahrungen vorliegen, sollte die Prüfung nach einer Ruhezeit von einer Stunde wiederholt werden.

Für die Prüfung der mechanischen Eigenschaften und der Durchlässigkeit der erhärteten Dichtwandmasse (nach Abschnitt 5 und 6 dieser Empfehlung) werden einheitliche Probenabmessungen gewählt. Die fließfähige Dichtwandmasse wird in Rohrstützen mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Höhe von mind. 12 cm gegossen und anschließend unter Wasser gelagert. Das Wasser soll während der gesamten Lagerungsdauer eine Temperatur von  $18\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  haben.

Unmittelbar vor den Versuchen an der erhärteten Dichtwandmasse werden die Probekörper aus den Rohrstützen entnommen und durch Abtrennen des oberen Teiles auf eine Höhe von  $h = 10\text{ cm}$  gekürzt. Die Endflächen müssen danach plan und zueinander parallel sein. Dichtwand-Fertigmischungen sind ohne Ausquellzeit gebrauchsfertig. Dementsprechend ist mit der Prüfung der fließfähigen Dichtwandmasse unmittelbar nach dem Anmischen zu beginnen.

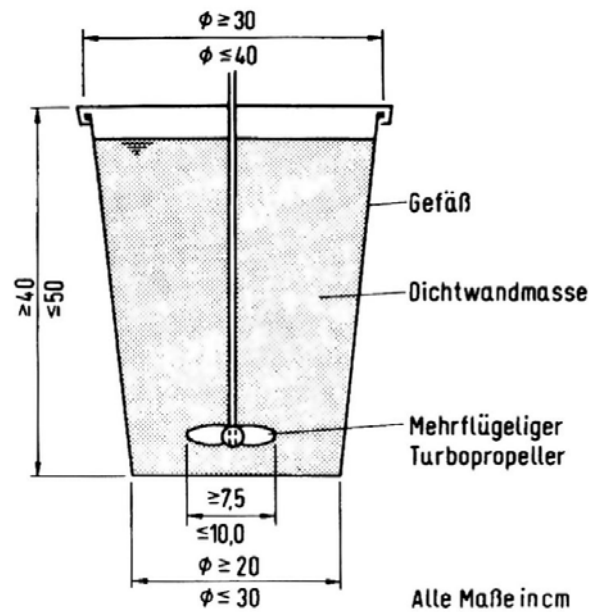


Bild 3-2.1: Herstellung der Dichtwandmasse im Labor, Mischbehälter und Mischflügel

Tabelle 3-2.1: Messung der Eigenschaften der Bentonitsuspension bzw. der frischen Dichtwandmasse

Kennwert		Standard-Messgeräte
Dichte	(t/m <sup>3</sup> )	Spüluingswaage Hydrometer Pyknometer
Auslaufzeit	(s)	Marsh-Trichter
Filtratwasserabgabe	(cm <sup>3</sup> )	Filterpresse (API) 7 bar, 7,5 min
Fließgrenze	(N/m <sup>2</sup> )	Pendelgerät Larümeter Kugelharfe Fann-Viskosimeter
Absetzmaß	(%)	Messbecher, Füllhöhe zu Durchmesser $\leq 2$
pH-Wert		pH-Meter Messstreifen

### 3 Prüfung der Eigenschaften der frischen Dichtwandmasse

Die Eigenschaften der Bentonitsuspension beim Zweiphasenverfahren bzw. der Dichtwandmassen beim Einphasenverfahren bestimmen die Standsicherheit des offenen Schlitzes während der Herstellung und müssen daher bestimmt werden. Außerdem geben die Theologischen Eigenschaften Hinweise auf die Verarbeitbarkeit der Dichtwandmasse.

Im Einzelnen sind die in der Tabelle 3-2.1 aufgeführten Kennwerte zu bestimmen. Weitere Erläuterungen zu den Prüfgeräten enthält DIN 4127.

## 4 Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit und zum Erstarrungsverhalten

Für die Beurteilung der Verarbeitbarkeit und des Erstarrungsverhaltens mineralischer Dichtwandmassen können so genannte Rührversuche [3] durchgeführt werden. Im Rührversuch wird die Dichtwandmasse jeweils fünf Minuten lang gerührt und anschließend 15 Minuten in Ruhe gelassen. Dieser Vorgang erstreckt sich über die abgeschätzte Verarbeitungsdauer der Dichtwandmasse auf der Baustelle. Die Rührversuche sind über einen Zeitraum von mindestens acht Stunden durchzuführen. Die Abmessungen des Mischwerkzeuges und des Gefäßes können von den Angaben im Abschnitt 2 abweichen. Es muss sichergestellt sein, dass während der Versuchsdurchführung die gesamte Dichtwandmasse in Bewegung gehalten wird. Die Drehzahl des Mischwerkzeuges soll im Bereich  $500 \pm 200$  Umdrehungen je Minute liegen. Nach jeweils zwei Stunden Versuchsdauer wird die Auslaufzeit, die Fließgrenze sowie die Filtratwasserabgabe bestimmt, die Dichtwandmasse in Rohrstutzen gegossen und anschließend im Wasser bei  $18 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$  gelagert. An den Probekörpern wird nach 28 oder 56 Tagen Wasserlagerung die einaxiale Druckfestigkeit bestimmt, und die Ergebnisse sind in Abhängigkeit von der Rührzeit graphisch darzustellen. Die Wasserdurchlässigkeit wird an Proben mit acht Stunden Rührzeit ermittelt.

Weitergehende Versuche zum Erstarrungs- und Abbindeverhalten mit der Laborflügelsonde oder dem Nadelgerät nach *Vicat* (DIN 1164) können sinnvoll sein.

Filtratwasserabgabe, Fließgrenze und Absetzverhalten von Dichtwandsuspensionen können temperaturabhängig sein. Daher sind für den Baustelleneinsatz diese Kennwerte zusätzlich bei einer Misch- und Rührtemperatur von  $+ 10 \text{ °C}$  zu bestimmen.

## 5 Festigkeits- und Spannungs-Verformungs-Verhalten

Zur Beurteilung des Spannungs-Verformungs-Verhaltens wird an den erhärteten Proben nach 14, 28 und 56 Tagen Wasserlagerung die einaxiale Druckfestigkeit nach DIN 18 136 bestimmt, wobei die in Abschnitt 2 gewählten Probenabmessungen von der DIN 18 136 abweichen. Für die Umrechnung der Ergebnisse kann die in Bild 3-2.2 dargestellte Beziehung verwendet werden. Als Prüfergebnis ist das vollständige Spannungs-Verformungs-Diagramm anzugeben. Die einaxiale Druckfestigkeit soll in Abhängigkeit vom Probenalter graphisch dargestellt werden.

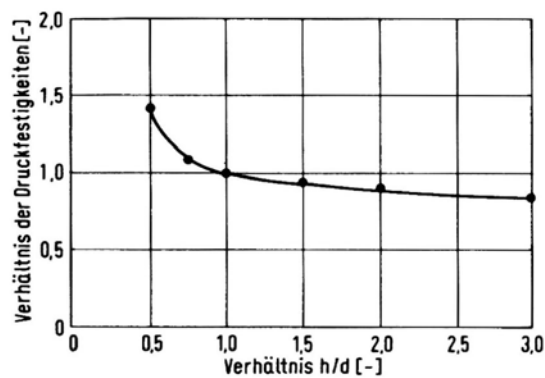


Bild 3-2.2: Einfluss der Probekörperschlankheit auf die einaxiale Druckfestigkeit von Dichtwandmassen [4]

Für genauere Aussagen über das Verformungsverhalten oder die Scherfestigkeit sind die in der Bodenmechanik üblichen Kompressionsversuche oder Dreiaxialversuche durchzuführen. Letzteres gilt z. B., wenn im oberen Teil der Dichtwand Spundwände, Stahlbetonfertigteile oder ähnliches zur planmäßigen Abtragung von Lasten eingebaut werden oder wenn die Dichtwand planmäßig durch Verformungen beansprucht wird (z. B. Bergsenkung, einseitige Auflast neben der Wand etc.).

## 6 Prüfung der Durchlässigkeit

Das Durchlässigkeitsverhalten mineralischer Dichtwandmassen wird nach 28, nach 56 oder nach 84 Tagen Wasserlagerung geprüft. In der Regel nimmt die Durchlässigkeit mit dem Probenalter ab. Für die Prüfung der Wasserdurchlässigkeit gilt unter Berücksichtigung der Probenabmessungen nach Abschnitt 2 dieser Empfehlung die E 3-1, Abschnitt 5. In Sonderfällen kann die Durchlässigkeitsprüfung bei noch größerem Probenalter erforderlich werden (s. E 5-8).

## 7 Filtratwasserabgabe

Die Ausführbarkeit von Dichtwänden und deren Qualität kann vor allem bei tief liegendem Grundwasserspiegel in stärker wasserdurchlässigen Böden durch die Filtratwasserabgabe der frischen Dichtmasse beeinflusst werden. Durch eine Filtration können sowohl der Baubetrieb behindert als auch die Materialeigenschaften der Dichtmasse durch die Feststoffanreicherung und durch einen Austrag gelöster Suspensionsbestandteile mit dem Filtratwasser verändert werden.

Eine Filtration der Dichtmassen ist allgemein in Sanden zu erwarten. In diesen Böden ist das Porensystem einerseits so durchlässig, dass das Filtratwasser ohne wesentlichen Widerstand abfließen kann. Andererseits müssen die Poren des Korngerüsts jedoch so klein sein, dass Feststoffpartikel der Suspension nicht oder nur gering penetrieren können. Ansonsten führen Penetrationen zu ausgeprägten Suspensionsverlusten, wobei sich gegebenenfalls ein Filtrationsvorgang noch anschließen kann.

Die Filtratwasserabgabe hängt im Wesentlichen von der gewählten Dichtmassenzusammensetzung, der Differenz zwischen Suspensions- und Grundwasserdruck an den Schlitzwandungen und der Filtrationsdauer ab. Die Filtratwasserabgabe verringert sich mit zunehmender Filtrationsdauer aufgrund der anwachsenden Dicke des Filterkuchens.

Unter der Annahme eines inkompressiblen Filterkuchens und bei Vernachlässigung des Filtrationswiderstandes des durchörterten Bodens kann die degressive zeitliche Entwicklung der flächenbezogenen Filtratwasserabgabe  $f(t)$  als Summenfunktion durch den einparametrischen Wurzelansatz

$$f(t) = a \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

hinreichend genau beschrieben werden [5]. Der Summenparameter  $a$  ist von den Druckverhältnissen und von den Eigenschaften der frischen Dichtmasse sowie des bereits ausgebildeten Filterkuchens abhängig und kann experimentell für die jeweilige Dichtmassenrezeptur bestimmt werden. Durch eine Transformation der Zeitachse  $\sqrt{t}$  gehen die zeitlichen Entwicklungen der kumulierten Filtratwasserabgaben in eine lineare Funktion über (Bild 3-2.3).

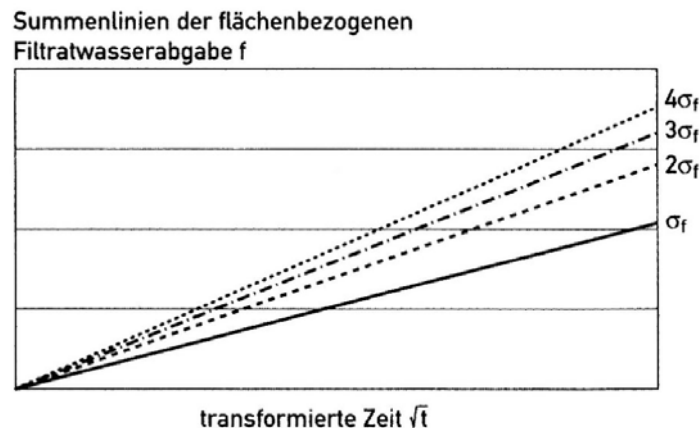


Bild 3-2.3: Filtratwasserabgabe einer feststoffreichen Calciumbentonitsuspension

Wird die Filtration durch den Aushubvorgang gestört, können sich aufgrund der begrenzten Filterkuchenhöhe die Filtratwasserabgaben erhöhen. Gleichzeitig kann die oberhalb des Filterkuchens verbleibende Suspension andicken.

Beim kontinuierlichen Aushub mit einer Schlitzwandfräse kann der Filterkuchen im Schlitz oberhalb des Fräsaggregats weitgehend ungestört stetig anwachsen und den Rückzug des Aushubwerkzeugs behindern oder vereiteln. Beim intermittierenden Aushub mit einem Schlitzwandgreifer kann ein Teil des Filterkuchens von der Schlitzwandung wieder abgeschert und in die Dichtmasse eingemischt werden.

Dies ist eine wesentliche Ursache für den Anstieg der Dichte und der Fließgrenze sowie der Filtratwasserabgabe der Dichtmasse im Schlitz. Entstehen zum Beispiel in

großen Tiefen lange Greiferzeiten, kann der Filterkuchen den Rückzug des Greifers ebenfalls behindern oder vereiteln. Bei lang andauernden Aushubvorgängen und ungünstigen Boden- und Grundwasserverhältnissen kann deshalb der Aushubvorgang zum Erliegen kommen.

Eine Beurteilung der im Einzelfall vorgesehenen Dichtmassenzusammensetzung hinsichtlich der zu erwartenden Filtrationsvorgänge ermöglichen Filterpressversuche, wie sie nach DIN 4127 bzw. DIN EN 1538 bereits Bestandteil der Prüfungen an reinen Stützsuspensionen sind. Die Versuchsrandbedingungen des Filterpressversuchs nach DIN 4127 sind jedoch für die Abschätzung des Filtrationsverhaltens einer Dichtmasse in einer bestimmten Schlitztiefe zu modifizieren (Tabelle 3-2.2). Einerseits ist die Laufzeit des Versuchs von insgesamt 7,5 Minuten auf 30 Minuten zu verlängern. Dabei sind die Filtrationsdrücke zu reduzieren, um das Filtrationsverhalten unter tatsächlich im Schlitz zu erwartenden Filtrationsdrücken abzubilden. Der Maximaldruck kann bei tiefreichenden Wänden und tiefliegenden Grundwasserspiegeln eine Größenordnung von 200 kPa noch überschreiten.

Der Filtrationsdruck  $\sigma_f(z)$  lässt sich bei einem Grundwasserstand in einer Tiefe von  $Z_{GW}$  unterhalb des Dichtwandkopfs in Abhängigkeit von der Tiefenordinate  $z$ , der Suspensionswichte  $\gamma_{sus}$  und der Wichte des Wassers  $\gamma_w$  wie folgt berechnen:

$$\begin{aligned} \text{für } z \leq Z_{GW} & \quad \sigma_f(z) = z \cdot \gamma_{sus} \\ \text{für } z \geq Z_{GW} & \quad \sigma_f(z) = z \cdot (\gamma_{sus} - \gamma_w) + Z_{GW} \cdot \gamma_w \end{aligned} \quad (2)$$

Tabelle 3-2.2: Filterpressversuch

Kennwert	Randbedingung des Filterpressversuchs	
	modifiziert	nach DIN 4127
Filtrationsdruck (kPa)	50-200	700
Filtrationszeit (min)	30	7,5

Das Filtrationsverhalten der frischen Dichtmasse sollte unter projektbezogenen Prüfbedingungen in den Tiefenlagen ermittelt werden, in denen nichtbindige Bodenschichten als Filtrationsmedien anstehen.

Zur Durchführung des modifizierten Filterpressversuchs wird die frische Dichtmasse in den Filterpressentopf gefüllt. Die Oberfläche der Suspension wird mit einem trockenen Filterpapier und einem Sieb abgedeckt, der Filterpressentopf mit einem Deckel verschlossen und in den Versuchsstand eingebaut. Innerhalb von 30 Sekunden wird der Filtrationsdruck  $\sigma_f(z)$  auf die Suspension aufgebracht und für die weitere Versuchslaufzeit konstant gehalten. Das Volumen des Filtratwassers wird im Messzylinder aufgefangen und nach der vorgegebenen Versuchslaufzeit abgelesen.

Für eine bestimmte Tiefenlage kann die Filtratwasserabgabe bei ungestörtem Anwachsen des Filterkuchens aus dem Ergebnis eines Filterpressversuchs nach einer Filtrationsdauer  $t_f$  für eine beliebige Zeit  $t$  näherungsweise mit nachstehender Gleichung rechnerisch ermittelt werden:

$$f(t) = f(t_f) \cdot \sqrt{\frac{t}{t_f}} \quad (3)$$

**Literatur zu E 3-2:**

- [1] MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND FORSTEN  
BADEN-WÜRTTEMBERG: Leitfaden für die Beurteilung und Behandlung  
von Grundwasserverunreinigungen durch leichtflüchtige  
Kohlenwasserstoffe., Stuttgart 1983.
  
- [2] DORGARTEN, H.-W, STROH, D. UND JOLAS, P: Deponie auf 70 m  
mächtiger Tagebauverfüllung. Vorträge der Baugrundtagung 1994 in  
Köln. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V, S. 69-84.
  
- [3] API AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE 1974: Standard Procedure for  
Testing Drilling Fluids, API RP13B, 5thEd.
  
- [4] MESECK, H., RUPPERT, F.-R. UND SIMONS, H.: Herstellung von  
Dichtungsschlitzwänden im Einphasenverfahren. Tiefbau 1979, H. 8,  
S. 601-605.
  
- [5] SCHLÖTZER, C: Filtrationsverhalten von Dichtsuspensionen an  
flüssigkeitsgestützten Erdwänden. Mitteilungen Institut für Grundbau,  
Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE). Universität  
Hannover. Herausgeber: Müller-Kirchenbauer, H. Heft 42, 1995.