

Theodoros Triantafyllidis

# Planung und Bauausführung in der Schlitzwand- und Dichtwandtechnik

- **Qualitätssicherung im Schlitz- und Dichtwandbau**
- **praxisgerechte Darstellung der Grundlagen**
- **praktische Anleitung vom Entwurf bis zur Ausführung**

Schlitzwände und Dichtwände haben eine breite Anwendung im Spezialtiefbau. Das Buch gibt praktische Anleitungen vom Entwurf bis zur Ausführung. Ziel ist es, das gegenseitige Verständnis von Planern, Ausführenden und Bauherren zu fördern und so zur Qualitätssicherung beizutragen.



10 / 2024 · ca. 380 Seiten · ca.  
54 Abbildungen · ca. 18 Tabellen

Softcover

**ISBN 978-3-433-03340-1** ca. € 59\*

eBundle (Softcover + ePDF)

**ISBN 978-3-433-03342-5** ca. € 79\*

**Bereits vorbestellbar.**

## BESTELLEN

+49 (0)30 470 31-236

marketing@ernst-und-sohn.de

[www.ernst-und-sohn.de/3340](http://www.ernst-und-sohn.de/3340)

## Vorwort

Es gab mehrere Gründe, welche Anlass zum Schreiben dieses Buches waren. Die Planung und die Bauausführung im Spezialtiefbau, die ich während meiner akademischen, bauausführenden und gutachterlichen Tätigkeit erlebte, gingen nicht Hand in Hand, sondern zeigten in vielen Projekten große Lücken. Diese Lücken würden einige Beteiligte als Unterschied zwischen Theorie und Praxis pauschalisieren, aber mit dieser Erklärung habe ich mich nicht abgefunden. In den Fällen, wo Planung und Ausführung in einer Hand lagen, hat man diese Lücken fast nie erlebt, und ein unterschiedliches Verständnis der jeweiligen Sachlage gab es nicht. Planer und Bauausführende waren unter dem Dach einer Fachfirma zu finden, und das Konzept konnte von Anfang an durch die Beteiligten ausführlich behandelt werden, wenn die Ziele und die angestrebte Funktion des Bauproduktes vom Auftraggeber entsprechend bestimmt waren.

In den letzten zwei Jahrzehnten hat sich diese Umgangskultur geändert. Globalisierung und „Rationalisierung“ haben dazu geführt, dass Bauaufgaben auch im Spezialtiefbau nicht mehr in einer Hand liegen. Ein Auftraggeber schaltet einen sogenannten Projektentwickler oder Projektsteuerer ein, welcher die Bauaufgabe nach seinen Vorstellungen und erhofften Erfolgsaussichten (Prämie bei Einsparung) unterteilt und ausschreibt, wobei es nicht selten vorkommt, dass alle Leistungen pauschaliert werden. Diese Pauschalierung hat anfangs nur die Bauausführung getroffen, aber zwischenzeitlich ist auch die Planung hiervon betroffen. Der ruinöse Wettbewerb mit dem Ziel, den „kostengünstigsten“ – oder öfters den vermeintlich „billigsten“ Anbieter zu beauftragen, hat dazu geführt, dass erfahrenes und äußerst fachkundiges Personal, welches entsprechend vergütet wird, durch jüngeres und nicht immer ausreichend fachkundig ausgebildetes ersetzt wird. Sogenanntes „Out-Sourcing“ von Personal bis hin zur Abschaffung ganzer Abteilungen hat verstärkt dazu geführt, dass teuer gewonnenes innerbetriebliches Fachwissen (sog. Know-how) de facto verloren gegangen ist und weiter verloren geht. Dieses Buch erhebt nicht den Anspruch, diese Lücke zu füllen, sondern eher das Verständnis der Planenden und der potentiellen Auftraggeber für einige Probleme der Ausführungspraxis zu erweitern und ihnen diese näher zu bringen. Gleichzeitig spricht das Buch die Bauausführenden an und versucht, Probleme der Planung bzw. theoretische

Grundlagen diesen Praktikern näher zu erläutern und mehr Sensibilität für die jeweiligen Bedürfnisse zu wecken. Die Lücke zwischen dem unterschiedlichen Verständnis von Planenden und Ausführenden sollte mit diesem Buch klarer und deutlicher werden, womit neue Wege der Qualitätssicherung gesucht und eingeschlagen werden. Dieses Buch entstammt aus meinen Vorlesungen für Spezialtiefbau an der Ruhr-Universität Bochum und an der Universität (TH) Karlsruhe sowie aus dem früheren Buch über Schlitz- und Dichtwände, welches nicht mehr aufgelegt wurde. Der spontanen Bereitschaft vieler Baufirmen und Zulieferer der Spezialtiefbauindustrie für die Bereitstellung von Fotos und sonstigen Unterlagen, Zeichnungen etc. bin ich zu tiefem Dank verpflichtet. Die entsprechenden Hinweise über die jeweiligen Quellen sind jeweils der Bildunterschrift zu entnehmen.

Für das Durchlesen des Manuskriptes sowie für wertvolle Hinweise und Anregungen möchte ich mich bei allen meinen Mitarbeitern am Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum sowie des Lehrstuhls für Boden- und Felsmechanik der Universität (TH) Karlsruhe bedanken. Allen Assistenten und insbesondere Herrn Dr. J. Vogelsang und Dr. D. König sowie dem technischen Zeichner Herrn G. Jankowsky, möchte ich für die Anfertigung der Skizzen, Zeichnungen und der Bildverarbeitung danken sowie Frau B. Schroer für die Schreivarbeiten zur Herstellung der ersten Fassung des Manuskriptes. An dieser Stelle möchte ich mich auch für die Mitwirkung meiner Frau Ilona zur Fertigstellung dieser Auflage bedanken.

Der Autor wurde seitens der Industrie und der potentiellen Anwender in der Baupraxis ermutigt, dieses Buch zu schreiben, da viele Hinweise zur Qualitätssicherung gegeben sind, die nicht notwendigerweise in allen Teilen der Bauindustrie vermittelt werden. Es gab Anregungen sowohl aus dem Inland, wie auch aus dem Ausland aufgrund der bisherigen Erfahrungen aus dem ersten Buch.

Der Autor hofft, dass dieses Buch rege gebraucht wird und wünscht den Lesern dabei viel Freude.

Karlsruhe, Februar 2024  
Theodoros Triantafyllidis

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Begriff Qualitätssicherung	3
1.2	Begriff Spezialtiefbau	4
1.3	Qualitätssicherung im Spezialtiefbau	6
<b>2</b>	<b>Schlitzwandtechnik</b>	<b>7</b>
2.1	Geschichtliches zur Entwicklung der Schlitzwandbauweise	7
2.2	Einsatzgebiete	13
2.3	Markantes Beispiel einer Spezialtiefbauaufgabe mit Schlitzwänden	17
2.4	Verfahren zur Schlitzwandherstellung	21
2.4.1	Zweiphasen-Verfahren	21
2.4.2	Einphasen-Verfahren	23
2.4.3	Kombinations-Verfahren	24
2.4.4	Tiefgründungen mit Schlitzwandelementen	26
2.5	Beschreibung der Herstellungsphasen	27
2.5.1	Vorarbeiten	28
2.5.2	Herstellung der Leitwand	30
2.5.2.1	Sonderformen von Leitwänden	33
2.5.2.2	Verstärkung von Leitwänden in weichem Boden	37
2.5.3	Aufteilung der Wand in Lamellen	38
2.5.4	Beispiel der Bemessung einer Leitwand	43
2.6	Aushub	45
2.6.1	Greiferverfahren	49
2.6.1.1	Mechanischer Schlitzwandgreifer	49
2.6.1.2	Hydraulischer Schlitzwandgreifer	53
2.6.1.3	Welches Greiferverfahren ist zu wählen?	54
2.6.2	Fräsverfahren	57
2.6.3	Auswahl des Aushubwerkzeuges	61
2.6.4	Besonderheiten beim Aushub	65
2.6.4.1	Beschränkte Arbeitshöhe	65

2.6.4.2	Meißeinsatz	66
2.6.4.3	Vorhandene Kanäle und Leitungen	73
2.6.4.3.1	Fall 1: Hindernisbreite $b < 55$ cm	75
2.6.4.3.2	Fall 2: Hindernisbreite $b > 55$ cm bis 2,0 m	75
2.6.4.4	Anschnitt von unbekanntem Leitungen und Kanälen	77
2.6.4.5	Hindernisse und deren Beseitigung	80
2.6.4.5.1	Anthropogene Hindernisse, Baureste	80
2.6.4.5.2	Findlinge und natürliche Hindernisse	81
2.6.4.5.3	Hindernisse beim Einsatz der Fräse	85
2.6.4.6	Schlitzwände durch Kellerräume	87
2.6.4.7	Schlitze durch alte Hafenanlagen oder Uferanlagen	88
2.6.4.8	Aushub unter druckhaften GW	89
2.7	Qualitätssichernde Maßnahmen für den Schlitzwandaushub	90
2.7.1	Kontrolle des Suspensionsspiegels	95
2.7.2	Überprüfung der Aushubtiefe	95
2.7.3	Überprüfung des vertikalen Schlitzwandaushubs	96
<b>3</b>	<b>Stützflüssigkeiten und ihre Eigenschaften</b>	<b>107</b>
3.1	Dichte und Wichte der Suspension	111
3.2	Viskosität, Fließgrenze, Thixotropie der Suspension	112
3.3	Modell zur Beschreibung der Suspensionseigenschaften	113
3.4	Bestimmung der Fließgrenze	117
3.5	Weitere Suspensionsprüfungen	125
3.5.1	Scherspannung $\tau_{500}$	127
3.5.2	Filtratwasserabgabe $f$	130
3.5.3	Tongehalt $g_{15}$	131
3.5.4	Bestimmung der Dichte der Suspensionen	132
3.5.5	pH-Wert-Messung	134
3.5.6	Bestimmung des Sandgehaltes	135
3.6	Anforderungen an stützende Flüssigkeiten und verwendete Tone	136
3.7	Bezeichnung der Suspensionen	137
3.8	Prüfung des angelieferten Tons	138
3.9	Suspensionsprüfungen (Häufigkeit, Zeitpunkt)	139
3.10	Zulässige Werte für Suspensionseigenschaften	139
3.11	Korrekturmaßnahmen zur Verbesserung der Suspensionseigenschaften	140
3.11.1	Zu niedrige Dichte	141
3.11.2	Zu hohe Dichte	141
3.11.3	Zu hohe Fließgrenze	141
3.11.4	Zu kleine Fließgrenze	141
3.11.5	Versandung der Suspension	142
3.11.6	Die Mischung wird instabil	142
3.12	Negative Einflüsse auf die Suspensionseigenschaften	144

- 3.12.1 Organisches Material 144
- 3.12.2 Salzeinflüsse 144
- 3.12.3 Sulfatgehalte 145
- 3.12.4 Chloridgehalte 146
- 3.12.5 Zement 146
  
- 4      **Aufbereitung der Stützflüssigkeit** 149**
- 4.1 Kleine Mischanlagen 149
- 4.2 Größere Mischanlagen 150
- 4.3 Supratananlage 151
- 4.4 Regenerierungsanlagen 152
- 4.5 Probleme beim Mischen und Lagern der Stützflüssigkeit 156
  
- 5      **Fugen und Abstellkonstruktionen** 161**
- 5.1 Abschalrohre 163
- 5.2 Flachfugenelemente 167
- 5.3 Abschalelemente aus Fertigteilen 168
- 5.4 Einige (besondere) Maßnahmen zur Verbesserung der Dichtigkeit von Fugen 171
  
- 6      **Nachweise für den offenen Schlitz** 175**
- 6.1 Sicherheit gegen Zutritt von Grundwasser 175
- 6.2 Sicherheit gegen Unterschreiten des statisch erforderlichen Flüssigkeitsspiegels 176
- 6.3 Nachweis der inneren Standsicherheit 177
  - 6.3.1 Stützdruckübertragung durch die Suspension 178
    - 6.3.1.1 Fall A 178
    - 6.3.1.2 Fall B 179
    - 6.3.1.3 Allgemeiner Fall 180
  - 6.3.2 Druckgefälle  $f_{s0}$  181
  - 6.3.3 Versuchsdurchführung zur Messung des Druckgefälles  $f_{s0}$  182
  - 6.3.4 Nachweisführung „innere Standsicherheit“ 184
  - 6.3.5 Berücksichtigung dynamischer Einflüsse beim inneren Standsicherheitsnachweis 191
  - 6.3.6 Sonderfälle der Stützung des Kornverbandes durch eine Suspension 194
    - 6.3.6.1 Stützung bei einem hydraulisch „geschlossenen“ System 194
    - 6.3.6.2 Stützung durch Fließvorgänge mit nicht thixotropen Suspensionen 195
- 6.4 Nachweis der äußeren Standsicherheit 196
  - 6.4.1 Ermittlung der wirksamen Stützkraft 197
    - 6.4.1.1 Vereinfachter Nachweis nach DIN 4126 zur Stützkraftabminderung 203

6.4.2	Wirksame Stützkraft bei horizontal geschichteten Baugrund	204
6.4.3	Berücksichtigung des Leitwanddrucks bei der Ermittlung der wirksamen Stützkraft	205
6.4.4	Ermittlung der Erddruckkraft	208
6.4.5	Nachweisführung bei statischen Lasten	223
6.4.6	Nachweisführung bei dynamischen Lasten	225
6.4.7	Äußere Standsicherheit nicht-ebener Schlitzte	226
6.4.8	FE-Simulation zur Herstellung und Versagen eines Eckschlitzes	242
<b>7</b>	<b>Bewehrung in Schlitzwänden</b>	<b>249</b>
7.1	Ausbildung der Bewehrungskörbe und der Aussparungen	252
7.2	Deckenanschlüsse	259
<b>8</b>	<b>Betonieren eines Schlitzwandelements</b>	<b>263</b>
8.1	Mögliche Betonierfehler	271
8.1.1	Vermischung von Bentonit und Frischbeton	271
8.1.2	Einfluss der Eintauchtiefe des Schüttrohres	271
8.1.3	Nicht genügende Anzahl von Schüttrohren	272
8.1.4	Fließverhalten des Frischbetons	273
8.2	Nacharbeiten von möglichen Fehlstellen in der Fuge	273
8.3	Nacharbeiten von Schlitzwandflächen beim Baugrubenaushub	276
8.4	Glatte Wandflächen und Vermeidung von Umlaufbeton	277
<b>9</b>	<b>Fertigteilschlitzwände</b>	<b>281</b>
9.1	Einbau von Fertigteiltragelementen in Schlitzwandbarrette	284
<b>10</b>	<b>Verformungen von Schlitzwänden</b>	<b>291</b>
10.1	Messungen an Schlitzwänden	293
10.2	Hinweise zum Einbau von Messeinrichtungen	298
10.2.1	Inklinometerrohre	299
10.2.2	Ankerkraftaufnehmer	302
10.3	Verformungsprognose in tiefen Baugruben	304
10.4	Einflüsse auf die Setzungen von benachbarten Gebäuden	311
10.5	Berücksichtigung von Installationseffekten	315
10.5.1	FE-Simulationen der Herstellung einer Schlitzwand neben einer existierenden Bebauung	321
<b>11</b>	<b>Dichtschlitzwände</b>	<b>331</b>
11.1	Dichtschlitzwandverfahren	333
11.1.1	Das Zweiphasenverfahren	333
11.1.2	Das Einphasenverfahren	337
11.2	Qualitätssicherung von Dichtwänden	345

11.3	Schmalwände	346
11.3.1	Anwendungen sowie Vorteile und Nachteile	346
11.3.2	Verfahren zur Schmalwandherstellung	349
11.3.3	Baustoffe für Schmalwände und ihre Eigenschaften	353
11.3.4	Qualitätssicherung bei der Herstellung von Schmalwänden	355
11.3.5	Hinweise zur Ausschreibung von Schmalwänden	357
11.4	Eignungsprüfungen von Dichtwandmassen	360
11.4.1	Lagerungsversuch	362
11.4.2	Diffusionsversuche	363
11.4.3	Erosionsversuche	364
11.5	Bestimmung der „Stichfestigkeit“ von Dichtwandmassen	365
11.6	Erfahrungen mit Einflüssen von Schadstoffen auf Dichtwandmassen	365
<b>12</b>	<b>Literatur</b>	<b>369</b>

## 3

## Stützflüssigkeiten und ihre Eigenschaften

Üblicherweise werden zur Stützung offener Schlitz Tonsuspensionen (Bentonitsuspensionen) eingesetzt, wobei in Extremfällen diese Flüssigkeiten entweder aus Wasser oder manchmal aus Polymeren bestehen. Es gibt auch Mischungen, die aus Bentonit und Polymeren bestehen. Die Verwendung von Polymeren ist nicht weit verbreitet. Die wichtigsten Gründe hierfür sind

- a) der Preis, der viel höher liegt als eine entsprechende Bentonitsuspension und
- b) die Lösbarkeit der Polymere im Grundwasser und im Falle einer starken GW-Strömung der Verlust an Stützwirkung.

Wir beschränken uns hier auf die weit verbreiteten Bentonitsuspensionen, bei denen das Bentonitpulver (3–6 % des Suspensionsgewichtes) mit einem großen Wasservolumen vermischt wird. Das Tonpulver löst sich im Wasser ähnlich wie Salz, allerdings zeigen mikroskopische Aufnahmen, dass es sich dabei um eine homogene Dispersion von sehr kleinen Tonpartikeln handelt. Die Flüssigkeit (hier Wasser) zusammen mit den in Dispersion befindlichen Partikeln bezeichnet man als Suspension (im Gegensatz zu einer *kolloidalen Mischung* wird erwartet, dass sich in einer *Suspension* die Partikel schneller absetzen können). Selbst wenn die Suspension in Ruhe ist, gibt es Kollisionen zwischen den Tonpartikeln aufgrund von anziehenden und abstoßenden Kräften bedingt durch die unterschiedlichen elektrischen Ladungen von benachbarten Partikeln und der Ladung der Flüssigkeit, welche auch als Elektrolyt bezeichnet werden kann. In einer ruhenden Suspension trennen sich die Tonpartikel nach einer Berührung. Eine Beigabe zur Suspension von einigen Promille-Anteilen an Salz kann die Situation allerdings verändern, da kollidierte Partikel zusammenbleiben und Flocken bilden (Flokkulation der Suspension). Entfernt man das Salz und rührt die Suspension, dann verschwinden die Flocken und das System wird in seine ursprüngliche Form zurückgeführt (Dispersion).

Eine bekannte Eigenschaft dieser Suspensionen ist die sog. *Thixotropie*. Darunter versteht man die Eigenschaft der Suspension, solange diese in Ruhe ist, eine gelartige Konsistenz anzunehmen oder steifer zu werden und diese Versteifung in Form einer Art Verflüssigung zu verlieren, wenn diese umgeformt oder gerührt wird. Diese Eigenschaft der Thixotropie hängt sehr eng mit den Anziehungs- und

Abstoßkräften zwischen den Tonpartikeln sowie deren Gleichgewichtszustand zusammen, wobei sich die feinsten Partikel aufgrund der an deren Oberfläche wirkenden elektrostatischen Kräfte nicht im Gleichgewicht befinden. Dieser Zustand kann entweder über Kontaktkräfte zwischen den Partikeln oder über Ionenadsorption zwischen den Tonmineralphasen ausgeglichen werden. Diese Kontakte oder der Austausch von Ionen führen zu ständigen Kollisionen zwischen den Partikeln. Je nachdem, wie die Partikel geladen sind oder das Ionenaustauschvermögen ist, gibt es mehrere Möglichkeiten der Partikelverbindungen in einer Suspension, welche die Eigenschaften der Suspensionen beeinflussen. Am Beispiel des Hauptbestandteils von Bentonit, nämlich dem Hauptmineral Montmorillonit (neben anderen Mineralien wie Quarz, Feldspat, Glimmer, Pyrit usw.) kann man sich das Ionenaustauschvermögen vorstellen, wie in der Abb. 3.1 dargestellt ist.

Das dreischichtige Tonmineral Montmorillonit bildet dünne Plättchen, an deren Oberfläche Wasser angezogen und angelagert wird. Das Mineral besteht aus Partikeln dieser Dreifachschichten. Da das Tonmineral sich nicht im Wasser auflöst, sondern mit seinen Plättchen als Feststoff im Wasser in der Schwebe bleibt, spricht man von einer Suspension. Zwischen den dreischichtigen Tonmineralen kann sich Wasser ansammeln, so dass dieses Mineral extrem quellfähig ist (Abb. 3.1a).

Die dünnen Plättchen zeigen eine negativ geladene Oberfläche, womit sich Wasserdipole an ihrer Oberfläche binden können. An den Enden der Plättchen findet man positive elektrische Ladungen in Abhängigkeit von der Art und Menge der austauschbaren Ionen (z. B. kann das Si-Ion teilweise durch Al-Ionen ausgetauscht werden). Montmorillonit zeigt eine extreme Bereitschaft zum Austausch von Ionen. Als Maß hierfür wird das sog. Basenaustauschvermögen in meq/100 g benutzt, welches bei Montmorillonit sehr hohe Werte zeigt (Abb. 3.1a).

In Abhängigkeit von den Ladungen der Einzelplättchen sowie des Mediums (Elektrolyt, hier Wasser) formen diese Plättchen entweder Stapel oder Haufen (Abb. 3.1b). Diese Plättchen können Aggregate bilden sowohl bei einer Dispersion wie auch einer Flokkulation (Flockenbildung). Die Verbindungen zwischen den Partikeln werden hauptsächlich von 3 Moden bestimmt:

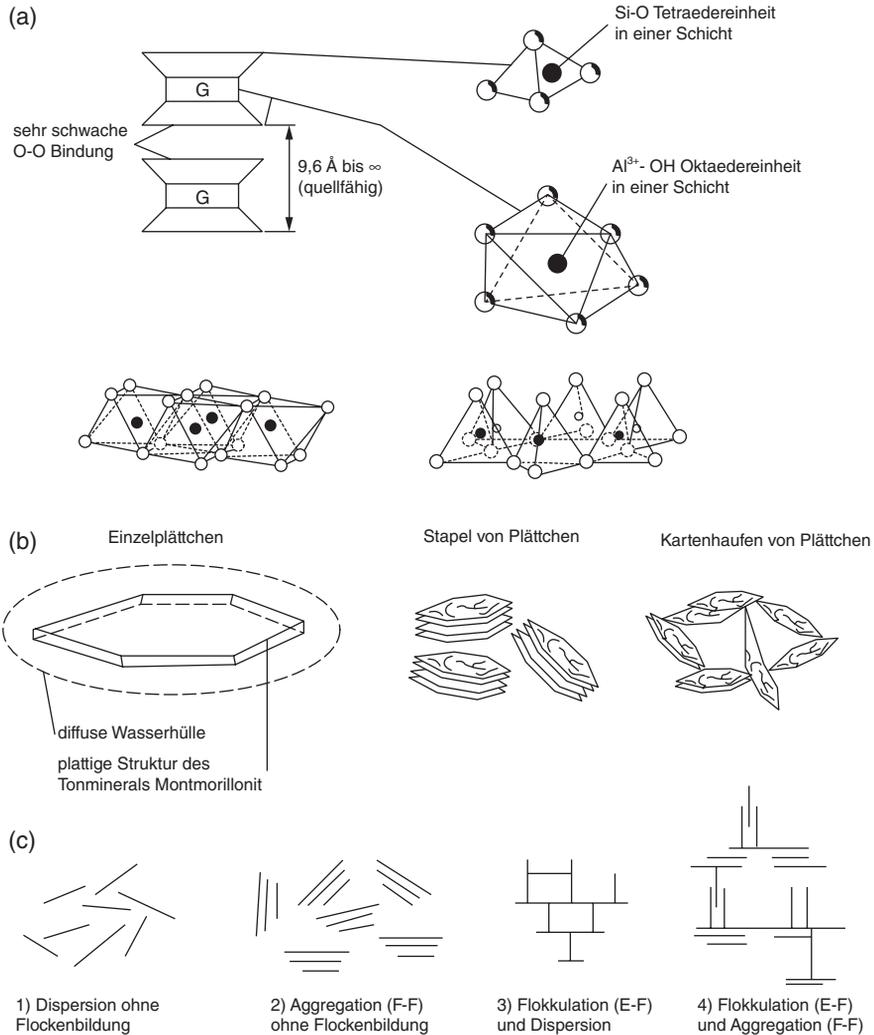
EF: edge-to-face;

FF: face-to-face;

EE: edge-to-edge.

Die EE- oder EF-Verbindungen führen zu dickeren Flocken wobei die FF-Verbindungen zu dickeren Aggregaten führen.

Die Viskosität von Bentonitmischungen steigt generell, wenn Konglomerate von EE- und EF-Verbindungen vorliegen, und wird kleiner, wenn die Tonpartikel aufgrund von FF-Verbindungen dicker werden. Die Gelbildung bei Abwesenheit von Salz (oder geringen Salzkonzentrationen) wird eher auf EE- und EF-Verbindungen zurückgeführt, welche ein kontinuierliches Gebilde – ähnlich eines Kartenhauses – im ganzen Volumen der Suspension erzeugen. Wenn parallel zu den anderen Verbindungen auch FF-Verbindungen auftreten, dann wird die Anzahl der



**Abb. 3.1** (a) Aufbau des Montmorillonits mit Basenaustauschvermögen von 80–150 meq/100 g, (b) Strukturen von Tonmineralplättchen, (c) Formen der Partikelbindungen in Suspensionen.

Kartenhäuser verringert und demzufolge nimmt die Fließgrenze der Suspension ab. Im idealen Fall einer EF-Verbindung kann man davon ausgehen, dass je kleiner die Partikel sind umso kleiner auch der Gewichtsanteil der feinen Tonminerale sein muss, um so das ganze Volumen mit einer Kartenhausstruktur zu erfassen und somit eine minimale Scherfestigkeit erreicht werden kann. Wenn z. B. eine Na-Montmorillonit-Suspension in einer 2 %-Konzentration gerade noch ausreicht einen Mindestwert von Gelfestigkeit zu erreichen, so muss diese Konzentration bei einer Ca-Bentonit-Suspension um das 3–4-fache erhöht werden, damit dieselbe

Anzahl von Kartenhäufchen bzw. die gleiche Scherfestigkeit erreicht wird, da die Ca-Montmorillonit Partikel aufweisen, welche 3–4 mal größer sind als diejenigen bei Na-Montmorilloniten.

Der Grad der Dispersion der Tonpartikel oder der Flokkulation ist auch wichtig für das Filtrationsverhalten der Suspension an Grenzflächen, wie z. B. Boden. Bei einer stabilen Suspension führt die Abgabe von Wasser zu einem relativ dünnen Film von Tonpartikeln (sog. Filterkuchen). Bei einer Suspension die bereits Flocken gebildet hat, wird dieser Film auch dicker sein und gleichzeitig poröser, mit dem Resultat, dass mehr Tonpartikel notwendig werden (also größere Ausfilterung der Suspension) um einen dichten Film (wasserundurchlässigen) an der Schlitzwandung zu erreichen. Über diesen Film in Abhängigkeit auch von der Bodenart übt die Suspension einen hydrostatischen Druck auf die Schlitzwandungen aus, der größer sein muss als derjenige des Erddruckes und des Grundwasserdruckes, welcher vom Boden auf den offenen Schlitz ausgeübt wird.

Die Aufgaben, welche eine Stützflüssigkeit in einem offenen Schlitz zu erfüllen hat, sind vielfältig. Sie sind bodenabhängig und teilweise gegenläufig, deshalb ist man gezwungen, deren Eigenschaften in festen Grenzen zu halten und zu kontrollieren. Die Bildung des Filterkuchens zur Übertragung des Suspensionsdrucks auf den Boden setzt voraus, dass der Boden nicht so durchlässig ist, dass die Stützflüssigkeit in dem Boden verschwindet ohne dabei einen Filterkuchen zu bilden (z. B. bei Großkies). Trifft man nun in dünnen Lagen solch grobe Materialien, so kann man der Stützflüssigkeit Sand beimischen, so dass die groben Poren an der Schlitzwandung mit Sand verfüllt werden, worauf sich eine Membran (Filterkuchen) ausbilden kann. (Bei rein bindigen Böden ist eine solche Membran nicht notwendig, da das Bodenmaterial an sich eine solche Membran bildet). Die Suspension hat aber auch die Aufgabe eine stützende Kraft auch auf das Einzelkorn auszuüben, so dass einzelne Kornfraktionen nicht aus der Schlitzwandung herausgelöst werden können (innere Stabilität). Will man nun beide Stützwirkungen (äußere, innere) mit hohen Konzentrationen und dickflüssigen Bentonitsuspensionen erreichen, so würde dies beim Aushub und Betonieren zu Behinderungen führen. Für diese Aufgaben bräuchte man eher eine dünnflüssigere Suspension. Dieser Widerspruch lässt erkennen, dass für die vorliegenden Bodenarten und Bauaufgaben (Betonschlitzwand, Dichtwand) ein angepasstes Mischungsverhältnis für die Suspension zu finden und im Betrieb einzuhalten ist. Deshalb ist es wichtig, die maßgebenden Eigenschaften der Suspension zu kennen, sowie diese im laufenden Betrieb durch Laborversuche zu kontrollieren und wenn es die Situation erfordert, entsprechend anzupassen.

Die wichtigsten Eigenschaften sind

- Viskosität, Fließgrenze, Thixotropie (rheologische Eigenschaften)
- Dichte oder Wichte (physikalische Eigenschaft)

Eine weitere Eigenschaft, wie z. B. die Stabilität der Suspension hängt mit der Bildung des Filterkuchens und der Filtratwasserabgabe der Suspension zusammen. Einflüsse, die die Stabilität beeinflussen können, sind Verunreinigungen,

hauptsächlich durch Zement (Herabsetzung des Wasserbindevermögens) oder durch Salze oder Säure (z. B. bei Humus) im Boden. Bei solchen Böden werden dem Trockenbentonit Zusätze beigegeben, welche die Filtratwasserabgabe regulieren. Bei Dichtungswänden, bei denen Zement und Bentonit verwendet werden, kommt ein spezieller Bentonit zur Anwendung, der zementverträglich ist. An dieser Stelle ist auch zu erwähnen, dass beim Betonieren eines Schlitzes jede Verunreinigung der Bentonitsuspension mit Zement vermieden werden soll. Dies ist auch einer der Gründe, weshalb Betonierrohrkupplungen wasserdicht sein müssen.

In vielen Bauaufgaben werden Bentonitsuspensionen nach dem Erstverbrauch wieder verwendet. In solchen Fällen, je nach Entsandung der verwendeten Suspension, kann eine Aufladung mit feineren Bodenanteilen vorliegen. Neben der Erhöhung der Dichte der Suspension kann jedoch die Fließgrenze herabgesetzt werden. Da die Fließgrenze auf elektrischen Ladungen zwischen den Bentonitpartikeln basiert, kann eine hohe Anlagerung mit Feinanteilen durch die Zwischenlagerung zwischen geladenen Teilchenoberflächen eine Schwächung des elektrostatischen Feldes bewirken, wodurch die Scherung zwischen den Bentonitteilchen erleichtert wird.

Solche Prozesse können weitestgehend vermieden werden, wenn für die Entsandung der verwendeten Suspension eine ausreichende Anzahl an Zyklonen mit der kleinsten möglichen Düse vorgehalten werden (Begrenzung durch Bentonitpartikelgröße). Die dann erreichbare Fließgrenze hängt von der Entsandungsleistung, wie auch vom anstehenden Boden ab und im Rahmen der Ausführung sind Versuche auf der Baustelle notwendig, um den Einfluss der Aufladung der Suspension mit Feinanteilen auf die Fließgrenze zu überprüfen und gegebenenfalls die weitere Verwendung, entweder auszuschließen oder unter erneuter Regenerierung und Beimischung von Frischsuspension zu ermöglichen.

### 3.1 Dichte und Wichte der Suspension

Die Tonpartikel können zwischen ihren Plättchen Wasser anlagern. Durch die Wasseranlagerung vergrößert sich ihr Abstand um die Dicke der Wasserschicht, die aufgenommen wurde. Das Material quillt. Wasser kann nicht beliebig aufgenommen werden (z. B. 25 kg Bentonit kann maximal ca. 800 bis 850 Liter Wasser aufnehmen). Wenn mehr Wasser zugegeben wird, setzt sich dieses Wasser auf der Suspension ab und die Suspension verliert ihre Stabilität.

Ein Quellen der Suspension mit einer optimalen Wasserzugabe resultiert in einer Fließgrenze, welche auch einen maximalen Wert erreichen kann.

Die Wasseraufnahme von Trockenbentonit bis zur Erreichung der Fließgrenze bestimmt die Dichte der Suspension, welche sowohl für die Phase des Aushubs als auch für die Phase des Betonierens von enormer Bedeutung ist. Dabei muss die Dichte einerseits so groß sein, dass dem resultierenden auf den offenen Schlitz wirkende Wasser- und Erddruck genug hydrostatischer Widerstand aus der Suspension

entgegenwirkt. Auf der anderen Seite darf die Dichte nicht so groß werden, dass es beim Betonieren zu Vermischungen mit dem Frischbeton kommen kann bzw. der Frischbeton die Stützflüssigkeit nicht verdrängen kann. Eine anfangs eingestellte Dichte der Suspension wird mit dem Aushub im Schlitz immer dichter aufgrund der Aufladung mit Bodenpartikeln und gleichzeitiger Abgabe von Filtratwasser (also Wasserverlust). Die Dichte dieser Suspension kann durch Regenerieren und Wasserzugabe bis zu einem gewissen Grad korrigiert werden, so dass sie weiter verwendet werden kann. Die Dichte einer Suspension, bei der 45 kg Trockenbentonit mit 1 m<sup>3</sup> Wasser (= 1000 l) vermischt und homogenisiert wird, kann wie folgt ermittelt werden:

Korndichte des Bentonits:  $\rho_s = 2,7 \text{ t/m}^3$

Dichte des Wassers:  $\rho_w = 1,0 \text{ t/m}^3$

Dichte der Suspension  $\rho_F$ :

$$\rho_F = \frac{m}{V} = \frac{45 \text{ kg} + 1000 \text{ kg}}{\frac{45 \text{ l}}{\rho_s} + \frac{1000 \text{ l}}{\rho_w}} = \frac{1045}{\frac{45}{2,7} + 1000} = 1,028 \text{ t/m}^3 \quad (3.1)$$

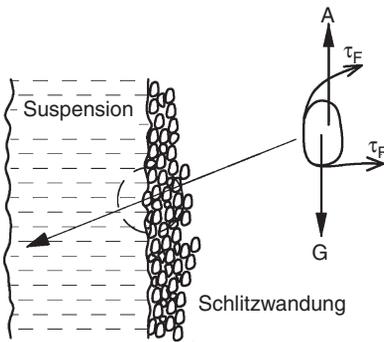
wobei m die Gesamtmasse und V das Gesamtvolumen darstellt.

### 3.2 Viskosität, Fließgrenze, Thixotropie der Suspension

Als Fließgrenze  $\tau_f$  wird die Scherspannung  $\tau$  definiert, bei deren Überschreitung in einer Stützflüssigkeit das Fließen eintritt. Bis zu dieser Grenze verhält sich die Suspension ähnlich wie ein fester Körper, aber nach der Überschreitung dieser Grenze verhält sich die Suspension wie eine Flüssigkeit. Bis zur Fließgrenze kann eine Suspension geringfügige Belastungen aufnehmen, ohne wegzufließen. Diese Eigenschaft ist unabhängig von der Viskosität des Materials, welches entweder eine geringe oder hohe Viskosität besitzen kann. Bekannterweise haben z. B. Wasser oder hochviskose Öle diese Fließgrenze nicht (z. B. ruhendes Wasser kann keine Schubspannung übertragen).

Die Eigenschaft der Fließgrenze von Bentonitsuspensionen wird in der Schlitzwandtechnik ausgenutzt, um den offenen Schlitz stabil zu halten. Eine Bentonitsuspension verhindert, dass Bodenkörper oder Korngruppen aus der Wandung herausfallen oder sich aus dem Kornverband lösen können (Abb. 3.2).

In der Abbildung 3.2 wird am Beispiel eines gerade noch nicht aus der Wandung herausfallenden Kornes die Wirkung der Fließgrenze gezeigt. Die resultierende Kraft aus der Verteilung der Fließgrenze  $\tau_f$ , welche auf die Oberfläche des Kornes wirkt, zusammen mit der Auftriebskraft (A) wirken gegen das Gewicht des Kornes, so dass Gleichgewicht im Grenzzustand herrscht. Die erforderliche Fließgrenze für eine stabile Schlitzwandung ist also auch vom maßgebenden Korndurchmesser des anstehenden Bodens abhängig. Daraus erkennt man, dass je größer der Korndurchmesser



**Abb. 3.2** Stützwirkung der Fließgrenze  $\tau_F$  an einem Korn der Schlitzwand.

ist, umso höher muss die Fließgrenze der Suspension sein, d. h. die Suspension muss „dicker“ werden.

Eine Erhöhung der Fließgrenze erreicht man bei entsprechender Bentonitzugabe, wobei für das Erreichen einer bestimmten Fließgrenze nach dem Quellen nicht nur die Menge sondern auch die Güte des Bentonits mit seinem Ionenaustauschvermögen von Bedeutung ist. Da das Ionenaustauschvermögen temperaturabhängig ist, kann man erwarten, dass bei niedrigen Temperaturen die Fließgrenze nach dem Quellen bei identischer Bentonitzugabe deutlich niedrigere Werte erreicht.

Für das Festlegen der Fließgrenze bei einer Bauaufgabe ist zunächst die überwiegende Schicht als maßgebend zugrunde zu legen, welche die größten Körner enthält. Mit speziell hierfür entwickelten Formeln (s. Abschnitt 3.4) wird eine erforderliche Fließgrenze ermittelt. Die Wahl der Fließgrenze hat aber auch Auswirkungen auf die Bewehrungsführung (s. Kapitel 7). Nach Festlegung der Grenzen kann der Bentonitgehalt für die Stützsuspension bestimmt werden.

### 3.3 Modell zur Beschreibung der Suspensionseigenschaften

Es gibt mehrere Stoffbeziehungen, welche einen zähen Stoff wie eine Stützflüssigkeit beschreiben. Bei den bisher üblichen Beschreibungen wird die Schubspannung  $\tau$  über den Viskositätsfaktor  $\eta$  mit dem sog. Schergefälle  $\dot{\gamma}$  oder  $\gamma(D)$  verbunden. Der einfache Versuchsaufbau in der Abb. 3.3 zeigt, wie man eine solche Beziehung herleiten kann.

Eine auf der Oberfläche der zähen Flüssigkeit geführte Platte wird mit der Kraft  $F$  horizontal verschoben. Die aufgrund dieser Bewegung auf die Flüssigkeit ausgeübte Schubspannung  $\tau$  errechnet sich aus:

$$\tau = \frac{F}{A_{\text{Platte}}} \quad (3.2)$$

Diese Schubspannung an der Grenzfläche Platte/Flüssigkeit erzeugt ein Geschwindigkeitsprofil in der viskosen Schicht der Dicke  $H$ , welches als linear mit der Tiefe verteilt angenommen wird (Abb. 3.3). Die plastischen Verformungen in der

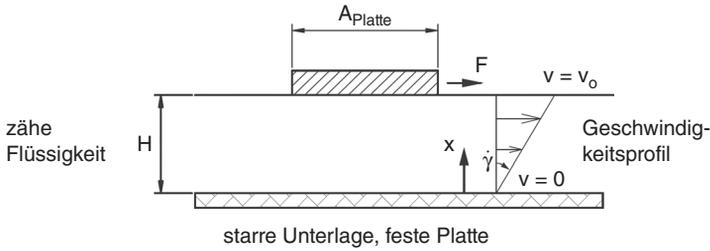


Abb. 3.3 Experiment zur Bestimmung der Viskosität einer zähen Flüssigkeit.

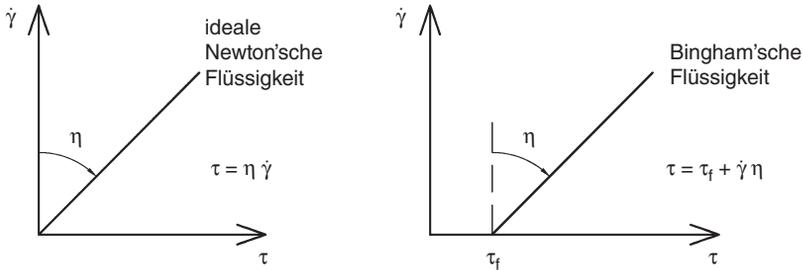


Abb. 3.4 Beziehungen zwischen Schergefälle  $\dot{\gamma}$  und  $\tau$  für (a) ideale Newton'sche und (b) Bingham'sche Flüssigkeiten.

Flüssigkeit werden über das Schergefälle  $\dot{\gamma}$  (häufig auch  $D$ ) dargestellt, welches lautet:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dx} = \frac{v_0 \text{ [m/s]}}{H \text{ [m]}} = \frac{1}{s} \quad (3.3)$$

Bei einem linear-viskosen Material wird die Schubspannung  $\tau$  linear zur  $\dot{\gamma}$  gesetzt

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (3.4)$$

mit  $\eta$ : Viskosität  $\left[ \frac{\text{kN} \cdot \text{s}}{\text{m}} \right]$

Diese ideale (lineare) Beziehung gilt für ideale Newton'sche Flüssigkeiten (z. B. Wasser, siehe auch Abb. 3.4).

Es gibt bestimmte Flüssigkeiten, bei denen sich die Platte nicht mehr beim Aufbringen einer beliebig kleinen Last  $F$  bewegt (Abb. 3.4), sondern erst beim Überschreiten einer bestimmten Grenzkraft, welche eine Spannung erzeugt, die wir bereits als Fließgrenze  $\tau_f$  ( $\tau_f = \tau (\dot{\gamma} = 0)$ ) bezeichnet haben.

Die entsprechende Beziehung (Abb. 3.4b) zwischen  $\tau$  und  $\dot{\gamma}$  lautet:

$$\tau = \tau_f + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (3.5)$$

Bentonitsuspensionen verhalten sich weder wie eine Newton'sche noch wie eine Bingham'sche Flüssigkeit sondern eher wie eine *thixotrope* Flüssigkeit. Thixotrope Flüssigkeiten unterscheiden sich von den einfachen plastischen Flüssigkeiten durch

das Auftreten einer dynamischen und einer statischen Fließgrenze. Das Verhältnis zwischen statischer und dynamischer Fließgrenze hat man als Thixotropiezahl (Gl. 3.6) definiert. Das Schergefälle (Scher-Spannungsverhalten) für Bentonitsuspensionen ist in Abb. 3.5 dargestellt

$$\text{Thixotropiezahl} = \frac{\text{stat } \tau_F}{\text{dyn } \tau_F} \quad (3.6)$$

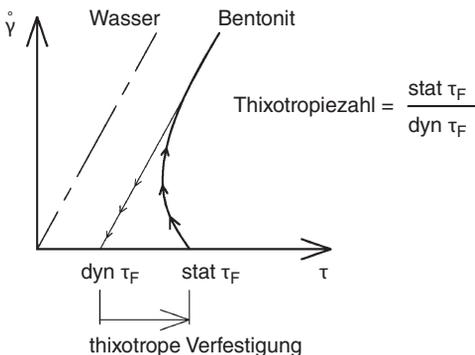
Das Diagramm nach Abbildung 3.5 kann wieder mit dem einfachen Versuch der Schubspannungsaufbringung mit einer Platte auf der Oberfläche der Suspension, nach Abb. 3.3, erklärt werden.

Die Flüssigkeit befindet sich zuerst in Ruhe. Wir bringen langsam eine Kraft (oder Schubspannung) auf, ohne die Flüssigkeit zur Bewegung zu bringen, bis die Fließgrenze erreicht wird. Danach beginnt sich die Platte zu bewegen. Ist die Bewegung eingetreten, bedarf es keiner zusätzlichen Kraft, um höhere Geschwindigkeiten zu erzeugen. Dies gilt jedoch nur bis zu einem bestimmten Wert der Fließgeschwindigkeit (bzw. Schergefälle). Nach Erreichen dieses Wertes bedarf es einer höheren Schubspannung, um höhere Werte des Schergefälles zu erzeugen (Abb. 3.5).

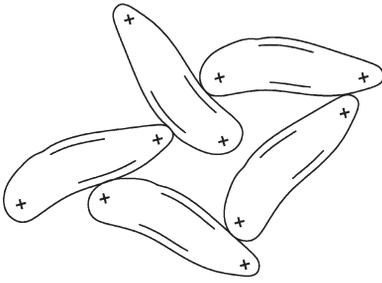
Falls nach einer aufgebrachtten Störung (Bewegung) der Suspension die Schubspannungen reduziert werden, reduziert sich auch die Schergeschwindigkeit bis zu einem Wert  $\text{dyn } \tau_F$  bei  $\dot{\gamma} = 0$ , welcher kleiner ist als der statische Wert ( $\text{stat } \tau_F$  auch bei  $\dot{\gamma} = 0$ ). Reduziert man nun die Scherspannungen unterhalb von  $\text{dyn } \tau_F$ , so kommt das System zur Ruhe und wenn man jetzt versucht, ein Geschwindigkeitsgefälle  $\dot{\gamma} > 0$  zu erzeugen, müssen Schubspannungen  $\tau_F$  mobilisiert werden, welche größer als  $\text{stat } \tau_F$  sind.

Diese Eigenschaft, dass das Material bei einer Bewegung geringere Scherfestigkeit aufweist als in Ruhe, bezeichnet man als Thixotropie. (Eine Begründung zur Wahl dieses Wortes, um diese Eigenschaft zu beschreiben, ist dem Autor nicht bekannt).

Dieses Phänomen lässt sich mit dem Aufbau des Tonminerals erklären sowie mit dem Quellvermögen veranschaulichen. Aufgrund des großen Austauschvermögens der jeweiligen Schichten gibt es elektrostatische Ladungen zwischen den Tonmineralschichten, welche eine Kartenhausstruktur ermöglichen (Abb. 3.6).



**Abb. 3.5** Schergefälle  $\dot{\gamma}$  als Funktion der Schubspannung  $\tau_F$  für eine Bentonitsuspension als Stützflüssigkeit.



**Abb. 3.6** Kartenhausstruktur von Tonpartikeln, welche elektrische Ladungen haben.

Die Spitzen der Tonteilchen sind positiv und die Seitenoberflächen negativ geladen. Dadurch entsteht eine Kartenhausstruktur. Um einen Fließvorgang auszulösen, muss eine Scherspannung aufgebracht werden, welche die durch die Kartenhausstruktur bedingte Festigkeit der Suspension überwindet. Mit dem Erreichen dieser Grenzspannung, der statischen Fließgrenze  $\tau_p$ , bricht die Struktur zusammen, die Partikel richten sich parallel zueinander mit einem Flüssigkeitsteil dazwischen aus und eine Bewegung ist nun leicht möglich.

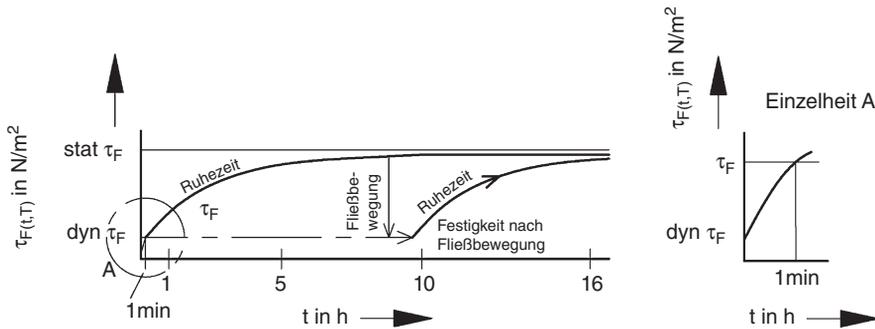
Nachdem die Scherung erfolgt ist und die elektrostatisch hervorgerufene Struktur zerstört ist, wird Zeit gebraucht, in der das System ruht, um diese Struktur wieder aufzubauen, d. h. die elektrischen Ladungen nach der Störung durch die Bewegung wieder herzustellen. Diese Eigenschaft des Materials hat man, wie bereits erwähnt, als *Thixotropie* definiert.

Die Fähigkeit der Bentonitsuspensionen eine Fließgrenze aufzubauen, wird bei der Stützung eines offenen Schlitzes im Boden oder einer Ortsbrust mit Hydro Schild im Tunnelbau genutzt. Die Suspension hat primär die Aufgabe, den Schlitz stabil zu halten und die Körner des Bodens an der Wandung des Schlitzes zurückzuhalten (Abb. 3.2). Gegen die Gewichtskraft, die auf das Korn wirkt, entwickelt die Suspension eine rückhaltende Kraft aus der Oberflächenspannung entlang der Kornkontaktfläche entsprechend der vorhandenen Fließgrenze. Die Fließgrenze muss ausreichend groß sein, um auch das Absinken des Größtkorns des Bodens zu verhindern. Die Wahl der Suspensionszusammensetzung (z. B. Tongehalt) muss so erfolgen, dass die Anforderung erfüllt ist.

Die zeitliche Entwicklung der Fließgrenze ist in der Abb. 3.7 dargestellt (etwaige Temperatureinflüsse sind nicht dargestellt) und wird auch als *thixotrope Verfestigung* bezeichnet. Sie ist reversibel, d. h. nach einer Störung wird der höhere Wert der Fließgrenze (stat  $\tau_p$ ) wieder erreicht, allerdings ist hierzu Zeit erforderlich.

Die Fließgrenze besitzt beim Abschluss der Fließbewegung ( $t = 0$ ) ihren Minimalwert  $\text{dyn } \tau_f$  (dynamische Fließgrenze) und nähert sich im Verlauf der Ruhezeit asymptotisch ihrem maximalen Grenzwert  $\text{stat } \tau_f$  (statische Fließgrenze). Die Grenzwerte und der Verlauf der Kurve sind temperaturabhängig.

Die Zeit  $t$  der thixotropen Verfestigung, nach der die Fließgrenze gemessen wurde, wird ebenso wie die Temperatur  $T$ , die während der thixotropen Verfestigung und der Messung geherrscht hat, im Index geschrieben, um die Fließgrenze zu



**Abb. 3.7** Thixotrope Verfestigung.

kennzeichnen. Zur Vereinfachung wird für  $t = 1 \text{ min}$  und  $T = 20 \text{ °C}$  auf die Angabe im Index verzichtet,  $\tau_F$  bedeutet also die Fließgrenze nach einer Verfestigungszeit von 1 min bei  $20 \text{ °C}$ . Diese Größe wird in der Grundbaupraxis am häufigsten benötigt. Die statische Fließgrenze  $\text{stat } \tau_F$  wird bei Tonsuspensionen genügend genau durch  $\tau_{F(16 \text{ h})}$  angenähert (s. Abb. 3.7).

Der Ansatz von 1 min für die Bestimmung der Fließgrenze in der Grundbaupraxis ist durchaus berechtigt. Man geht davon aus, dass bei einer Greiferfahrt eine gewisse Zeit verstreicht bis der Greifer wieder an der gleichen Stelle der Schlitzwandung vorbeifährt und eine erneute Störung der Ruhe der Suspension hervorruft. Eine minimale Zeit von einer Minute wurde in der Grundbaupraxis dafür auf der sicheren Seite abgeschätzt. Längere Fahrten des Greifers oder des Aushubgerätes bedeuten auch eine längere Ruhezeit für die Suspension an jeder Stelle der Schlitzwandung, und somit ist der Ansatz von einer Minute auf der sicheren Seite. Falls es zu schnelleren Prozessen (z. B. mit neuen Verfahren) beim Aushub kommt, ist dieser Ansatz zu überprüfen, da Werte der Fließgrenze zwischen der dynamischen Fließgrenze ( $\text{dyn } \tau_F$ ) und der Werte der Fließgrenze der Suspension bei einer kürzeren Ruhezeit als die 1 min maßgebend werden könnten.

Die thixotrope Verfestigung ist eine der wichtigsten Eigenschaften von Bentonit-suspensionen, welche einerseits für die Stabilität von offenen Schlitzten von Bedeutung ist, andererseits aber darf der Unterschied zwischen  $\text{stat } \tau_F$  und  $\text{dyn } \tau_F$  nicht allzu groß werden, da sonst das Betonieren des Schlitzes behindert werden kann. Deshalb werden Bentonite für die Schlitzwandtechnik bevorzugt, deren Suspensionen geringe Thixotropiewerte aufweisen.

### 3.4 Bestimmung der Fließgrenze

Die Bestimmung von  $\tau_F$  erfolgt nach dem Anmischen der Bentonitsuspensionen auf der Baustelle mit Hilfe der Kugelharfe (Abb. 3.8) oder des Pendelgerätes (Abb. 3.9). Sowohl bei der Kugelharfe wie auch beim Pendelgerät wird durch die jeweils

## 11

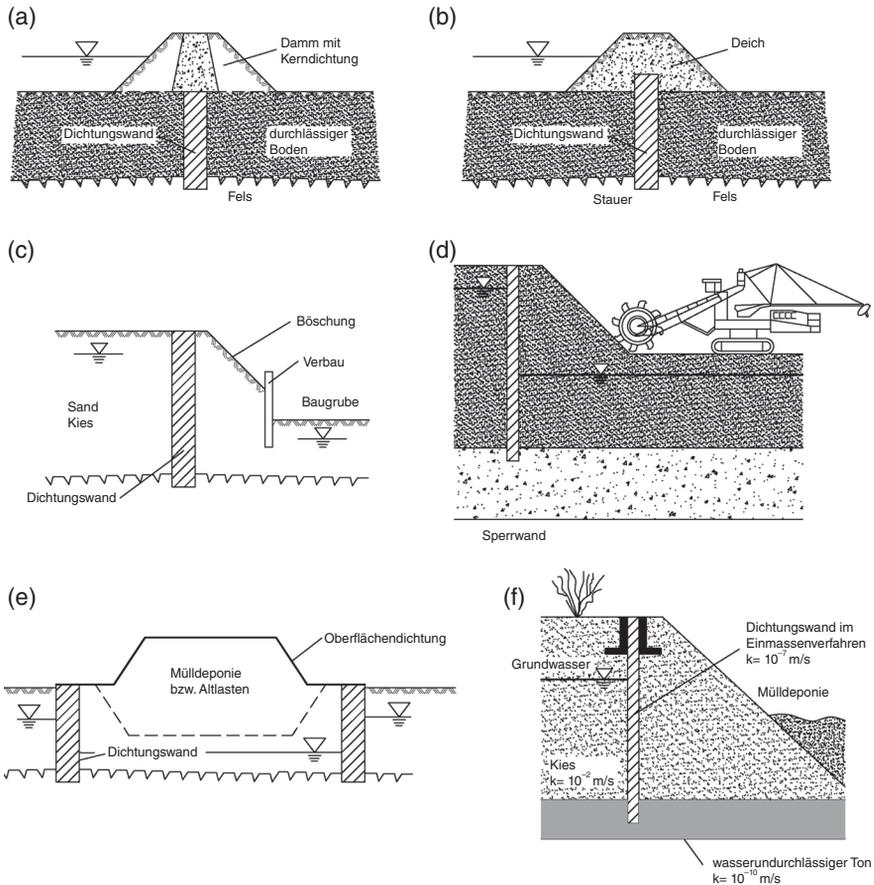
### Dichtschlitzwände

Die geschichtliche Entwicklung der Dichtschlitzwandbauweise ist unabhängig von der Schlitzwandbauweise. Die Verfahrensweise und das Aushubgerät haben jedoch heute zumindest teilweise eine gemeinsame Entwicklung. Die Schlitzwandtechnik für Verbauwände entstand aus der Notwendigkeit, tiefe und verformungsarme Wände ohne Absenkung des GW herzustellen, wogegen die Dichtschlitzwand als Verfahren ihren Ursprung in der Injektionstechnik hat.

Die Anwendungen der Dichtschlitzwände reichen von der Abdichtung unter einem Damm als Wasserreservoir der Hochwasserschutzanlage, unter Staudämmen oder im Bereich von Talsperren bis hin zur horizontalen Sperre eines GW-Leiters. Letzteres dient entweder der räumlichen Begrenzung einer GW-Absenkung (Trogbaugruben, Kohleabbau) oder zur Einkapselung von Deponien und Altlasten und demzufolge dem Schutz des Grundwassers vor Verunreinigungen. Erhöhte bautechnische und ökologische Auflagen bei Grundwasserabsenkungen sowie steigende Ansprüche beim Grundwasserschutz vor Kontaminationen haben zu einer Zunahme des Einsatzes von Dichtschlitzwänden geführt. Abbildung 11.1 gibt einige Beispiele für den Anwendungsbereich von Dichtwänden.

Bei Baugruben werden Dichtschlitzwände zur Abdichtung durchlässiger Bodenschichten bis in die weniger durchlässigen Schichten (oder Stauer) abgeteuft, wodurch aus dem Verbund der dichten Sohle und der Dichtwand eine Wanne entsteht. Innerhalb dieser Wanne werden GW-Absenkungen oder sonstige Maßnahmen durchgeführt ohne das GW der Umgebung zu beeinflussen. Diese Technik wird auch zum Unterbrechen eines Grundwasserstroms zum Zurückhalten von Kontaminationen eingesetzt. Sehr oft werden auch vorbeugend chemische Anlagen, Kraftwerke und Mülldeponien mit Dichtungsschlitzwänden umschlossen, wenn eine dichtende Sohle entweder von Natur aus oder durch eine Injektionsarbeit vorhanden ist.

Wenn eine Dichtschlitzwand nur eine abdichtende Aufgabe hat, z. B. als senkrechte Dichtungswand unter einem Staudamm oder hinter der Böschung einer Baugrube, so hat sie keine statischen Funktionen zu erfüllen und demzufolge muss das Dichtungsmaterial auch keine hohen Festigkeiten erreichen.



**Abb. 11.1** Anwendungen von Dichtwänden (a) Damm mit Dichtungskern; (b) Deich mit Dichtungswand; (c) Horizontale Absperrungen von Baugruben; (d) Sperrwand; (e), (f) Dichtwände zur Einkapselung von Deponien und Altlasten zur Schonung und Schutz des Grundwassers.

Die Hauptanforderungen an das Dichtungsmaterial sind geringe Durchlässigkeit und gute Verformbarkeit. Letztere ist notwendig, damit es bei Verformungen im Untergrund nicht zu Rissbildungen und daraus folgend zu Undichtigkeiten kommt. Dies ist ganz besonders wichtig bei Staudämmen, wo Verformungen des Untergrunds besonders groß werden können. Die Dichtschlitzwand muss diese Verformungen des Untergrundes ohne Rissbildungen mitmachen können.

Die Druckfestigkeit des Dichtungsmaterials muss mindestens so groß sein wie die des anstehenden Bodens, damit eine Einschnürung der Wand durch den Erddruck auf jeden Fall verhindert wird. Meist liegen die Druckfestigkeiten des Dichtungsmaterials jedoch darüber (Zylinderdruckfestigkeiten  $300 \text{ kN/m}^2$ – $500 \text{ kN/m}^2$ ).

Die prinzipiellen Verfahren zur Herstellung einer Dichtwand basieren entweder auf

- a) Austausch des anstehenden Bodens mit dem Abdichtungsmaterial (Dichtschlitzwandverfahren)
- b) Verdrängung des anstehenden Bodens und Einbau des Abdichtungsmaterials im freigewordenen Raum (Schmalwandverfahren)
- c) Vermischung des anstehenden Bodens mit dem Abdichtungsmaterial (mixed in place Verfahren oder MIP-Verfahren)

## 11.1 Dichtschlitzwandverfahren

Das Schlitzwandverfahren zur Herstellung vertikaler Dichtwände bietet folgende wesentliche Vorteile:

- Dicke, Tiefe und Verlauf der Wand können den jeweiligen Gegebenheiten angepasst werden (jede Dicke zwischen 0,4 m und 2,0 m ist möglich).
- Das Schlitzwandverfahren kann mit Spezialgeräten auch bei geringer Arbeitshöhe eingesetzt werden (Kapitel 2, Schlitzwandtechnik).
- Nahezu alle mineralischen Dichtwandmassen können im Schlitzwandverfahren eingebaut werden. Sie reichen von der selbsterhärtenden Bentonit-Zementsuspension bis zum Beton.
- In die Dichtschlitzwand können Kunststoffbahnen oder Stahlspundwände eingebaut werden (Abb. 11.2 und Abb. 11.3).

Die Herstellung von Dichtwänden im Schlitzwandverfahren ist heute nach zwei verschiedenen Bauverfahren möglich. Diese sind:

- das Zweiphasenverfahren und
- das Einphasenverfahren.

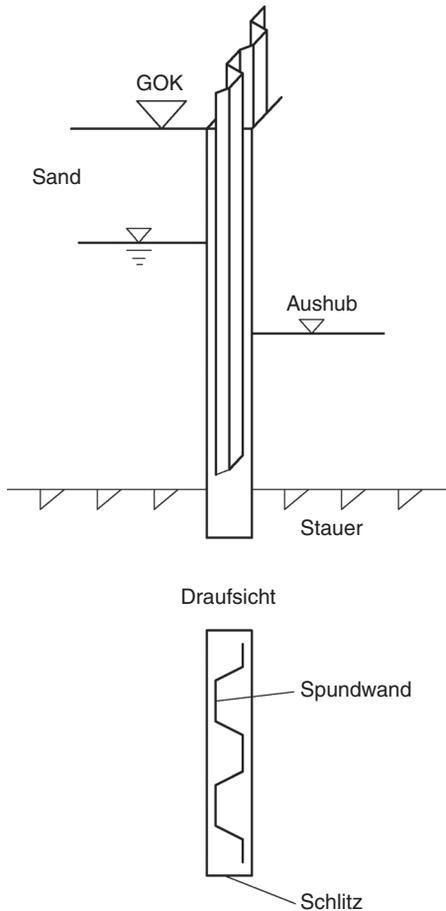
### 11.1.1 Das Zweiphasenverfahren

Das Verfahren entspricht der bekannten Schlitzwandbauweise für die Herstellung von statisch tragenden Wänden. Die Herstellung von Dichtungswänden nach diesem Verfahren erfolgt in zwei Arbeitsgängen (zwei Phasen). Im ersten Arbeitsgang wird – wie für eine Ortbeton-Schlitzwand – der Schlitz unter einer reinen Bentonit-Wassermischung als Stützflüssigkeit ausgehoben.

Im zweiten Arbeitsgang wird dann diese Stützflüssigkeit gegen das eigentliche Dichtungsmaterial ausgetauscht. Das Dichtungsmaterial wird im Kontraktorverfahren eingebracht und die Stützflüssigkeit, welche verdrängt wird, wird abgepumpt und muss entweder regeneriert oder beseitigt werden.

Zur Verdrängung der Bentonitsuspension durch die Dichtwandmasse muss zwischen den zwei unterschiedlichen Mischungen ein Dichteunterschied von mindestens  $0,75 \text{ t/m}^3$  bestehen.

Man benutzt bei diesem Verfahren ebenfalls eine Leitwand zur Führung des Aushubwerkzeugs (Fräse, Greifer), aber eine Begrenzung der Lamelle (Betonierabschnitt)



**Abb. 11.2** Dichtwand mit eingestellter Spundwand.

beim Greiferverfahren durch Abstellrohre (Kapitel 2) wie bei der Schlitzwand ist nicht unbedingt erforderlich, es sei denn, das erhärtete Dichtungsmaterial ist nicht mehr mit dem Greifer lösbar.

Wie für eine statisch tragende Schlitzwand werden zuerst die Primärlamellen (Vorläuferlamellen) hergestellt und dann mit Anschneiden der Vorläuferlamellen die Nachläuferlamellen dazwischengesetzt (Abb. 11.4). Im Beispiel der Abbildung 11.4 werden zuerst die Lamellen 2 und 4 ausgegriffen und anschließend wird die Lamelle 3 durch Übergreifen von 2 und 4 ausgehoben. Durch diese Vorgehensweise werden Fugen in den Dichtwänden vermieden, die evtl. Undichtigkeitsstellen sein könnten, zumindest solange die angeschnittene Dichtwandmasse noch nicht ausgehärtet ist. Durch den Einsatz einer Fräse kann man dasselbe erreichen.

Ob man eine Fräse- oder ein Greiferverfahren zum Aushub einsetzt, hängt von den Gegebenheiten ab, welche bereits für den Aushub einer statisch wirksamen Wand angegeben wurden (Kapitel 2.6). Der Fräseinsatz ist auf jeden Fall von Vorteil, wenn große Flächen von homogenem Material gefräst werden müssen. Durch

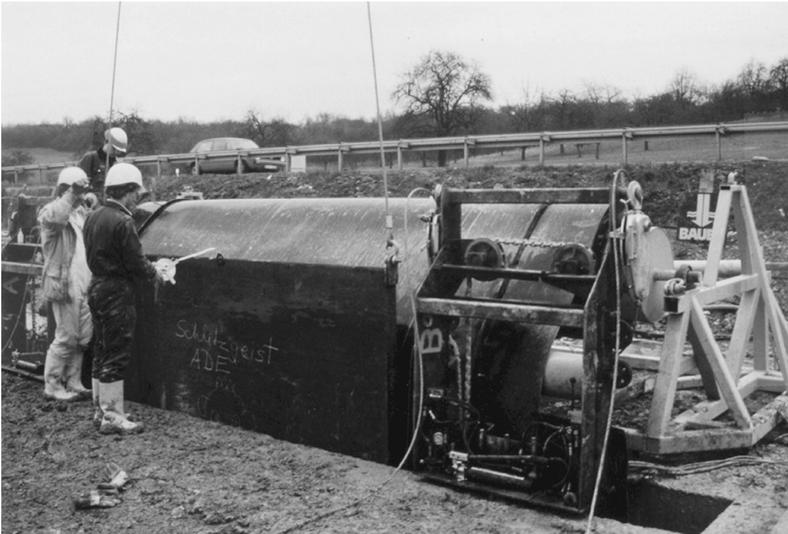


Abb. 11.3 Einbau einer Kunststoffbahn in eine Dichtwand (Bild: Bilfinger + Berger AG).

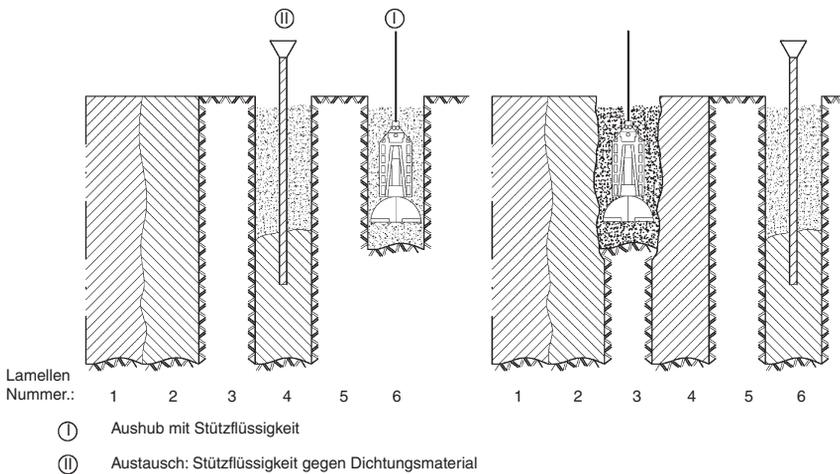


Abb. 11.4 Herstellung von Dichtwänden im Zweiphasenverfahren ohne die Verwendung von Abschalrohren.

neueste Entwicklungen sind elektronische Kontrollinstrumente für die Richtungs-  
genauigkeit und durch hydraulische Vorrichtungen sogar Korrekturmöglichkeiten  
für die Fräsrichtung gegeben, womit Dichtwände bis in große Tiefen (> 60 m) her-  
gestellt werden können.

Ständig überwacht werden die Drehzahl der Fräsräder, die Funktion der Fräs-  
gutabsaugung, die Leistungsaufnahme und Drehmomentabgabe der Fräsräder,

der Anpressdruck auf die Fräszähne und die Absenkgeschwindigkeit. Sehr oft müssen Dichtwände in Felsgestein hergestellt werden, besonders wenn dieses nicht massiv, sondern klüftig und evtl. verwittert ansteht. Ob nun ein Gestein fräsbar ist (mit vertretbarem Aufwand), wird in erster Linie von dessen Festigkeit, Klüftigkeit und Bankigkeit abhängen. Die Leistung von Fräsen hinsichtlich Aushub wird zwar in Prospekten von den Herstellern viel gepriesen, aber man soll immer die Rahmenbedingungen beachten, welche für den jeweiligen Erfolg maßgebend waren. Bis zu Festigkeiten von 50 MN/m<sup>2</sup> für den Sandstein sind moderate Leistungen der Fräse von 10–15 m<sup>2</sup>/h möglich. Darüber liegende Festigkeiten erfordern allerdings eine spezielle Bestückung der Fräse mit Rollenmeißeln und Zähnen. Dann können sich bis Festigkeiten von 80 MPa in Abhängigkeit der Klüftigkeit und Bankigkeit des Gebirges vertretbare Leistungen ergeben (manchmal unter enormer Materialschlacht hinsichtlich der verwendeten Zähne) und die erreichbare Vortriebsgeschwindigkeit kann zwischen 0,6 m/h und 1,0 m/h liegen. Ein solcher Aushub benötigt aber entsprechend viel Zeit. Hier erkennt man auch die Vorteile des Zweiphasenverfahrens gegenüber dem Einphasenverfahren, welches einen allzu großen zeitintensiven Aushub aufgrund der selbst erhärtenden Masse gar nicht zulässt.

Die Entscheidung, ob das Zweiphasen- oder Einphasenverfahren verwendet wird, hängt von vielen lokalen und gerätetechnischen Rahmenbedingungen ab. Das Zweiphasenverfahren ist vor allem vorzuziehen bei:

- langwierigem Aushubbetrieb mit Meißelarbeiten wegen harter Einlagerungen oder bei sehr tiefen Lamellen, wobei die Dauer des Aushebens nur sehr schwer abgeschätzt werden kann (dies gilt vor allem beim Felsaushub mit großen flächenmäßigen Wandanteilen),
- Dichtungsmaterial mit vorgeschriebener, hoher Druckfestigkeit (> 1 MPa),
- sehr durchlässigem Baugrund mit großen Suspensionsverlusten. Es ergibt sich beim Zweiphasenverfahren eine Vorabdichtung durch die kostengünstigere Bentonit-Suspension, während beim Einphasenverfahren die teure Einphasen-Mischung als Verlust angesehen werden kann.

Es gibt eine Fülle von Rezepturen, die für die Dichtwandmischung im Zweiphasenverfahren angeboten werden. Dieses Feld steht teilweise noch unter Entwicklung. Es gibt allerdings Standardrezepturen, die folgende Zusammensetzung für 1 m<sup>3</sup> Dichtwandmaterial aufweisen

Zement	170–300 kg
Bentonit	0–30 kg
Tonmehl	0–160 kg
Steinmehl	0–200 kg
Sandkies	900–1450 kg
Wasser	350–500 kg

Bei der angegebenen Rezeptur wird meist ein Verhältnis von Sand/Kies von 2:1 verwendet. Diese Rezeptur kann je nach Bedürfnis an höherer Festigkeit, geringerer Durchlässigkeit oder variabler Dichte verändert werden.

Als Beispiele werden hier zwei Mischungen für 1 m<sup>3</sup> Dichtwandmaterial angegeben

<b>Mischung 1</b>		<b>Mischung 2</b>	
Zement (HOZ)	170 kg	Zement (HOZ)	80 kg
Steinmehl	140 kg	Steinmehl	200 kg
Bentonit CV15	50 kg	Bentonit CV15	40 kg
Sand (0/5 mm)	1500 kg	Sand (0/5 mm)	1400 kg
Wasser	300 kg	Wasser	300 kg

Bei der Rezeptur 1 erwartet man eine Dichte von 2,2 t/m<sup>3</sup> und eine Druckfestigkeit von ca. 3 MN/m<sup>2</sup>, für die Rezeptur 2 eine etwas geringere Dichte von 2,0 t/m<sup>3</sup> aber eine wesentlich niedrigere Druckfestigkeit von ca. 1 MN/m<sup>2</sup>. Mit beiden Mischungen sind Durchlässigkeiten von  $k = 10^{-9}$  m/sec zu erreichen.

Speziell bei Abkapselung oder Absperrung der Sickerwässer von aggressiven Stoffen kann es zu Erosionsschäden durch den Zementangriff solcher Sickerwässer kommen. In solchen Fällen ist der Zement durch andere zementfreie Bindemittel zu ersetzen. Hierzu wird üblicherweise Wasserglas genommen, zusammen mit chemischen Härtern wie z. B. DynagROUT A und B von der Hüls AG. Die Eignung solcher Stoffe muss vorher für die jeweilige Aufgabe ermittelt werden.

Hierzu gibt es hinsichtlich der einzusetzenden Materialien spezifische Informationen von den Herstellern. Ein Beispiel einer solchen Mischung für eine Sonderabfalldeponie ist (1 m<sup>3</sup> Suspension):

Tonmehl	270 kg
Flugasche	48 kg
Kies/Sand 0,8 mm	1530 kg
Wasser	167 kg
DynagROUT-DWR A	2,5 kg
DynagROUT-DWR B	5,0 kg
Wasserglas (HK 30)	33 kg

Mit solchen Mischungen (Feststoffgehalt 80 Vol. %) ergeben sich Dichten von 2,06 t/m<sup>3</sup> und Durchlässigkeitskoeffizienten  $k \approx 10^{-9}$  m/sec sowie einaxiale Durchlässigkeiten nach 28 Tagen größer als 0,025 MN/m<sup>2</sup>.

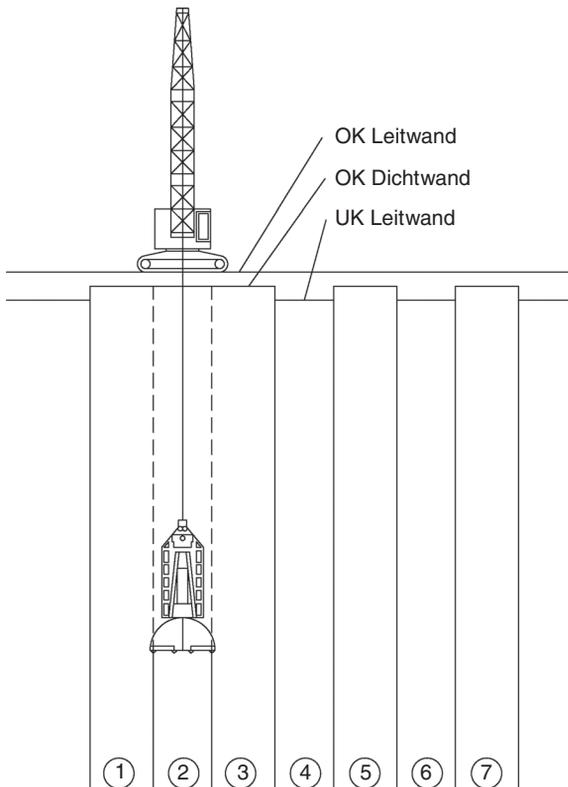
### 11.1.2 Das Einphasenverfahren

Beim Einphasenverfahren wird anstelle der beim Zweiphasenverfahren verwendeten Bentonit-Wasser-Suspension eine Bentonit-Wasser-Zement-Suspension (inkl.

anderer Feststoffe) als Stützflüssigkeit verwendet (Meseck u. a. 1979). Diese Suspension wird nicht mehr ausgetauscht. Nach dem Aushub einer Lamelle bleibt die Suspension stehen, der Zement erstarrt, die Stützflüssigkeit wird fest und übernimmt dann ihre Aufgabe als Dichtungsmaterial. Durch den Bentonit ergibt sich eine Durchlässigkeit von  $k \leq 10^{-8}$  m/s (etwa wie bei Ton) und durch den Zementanteil eine Druckfestigkeit bis zu 1 MPa oder gar 2 MPa.

Üblicherweise wird bei Dichtschlitzwänden das „Einphasenverfahren“ mit selbsterhärtenden Bentonit-Zementsuspensionen verwendet. Das Einphasenverfahren wird meist aus wirtschaftlichen Gründen benutzt und setzt voraus, dass die Ausführungszeiten (bis ca. 10–12 h) so kurz sind, dass das Dichtungsmaterial erst nach der Schlitzherstellung aushärtet. Es dürfen also keine großen Schwierigkeiten und kein Verzug der Aushubarbeiten auftreten, da sonst das Aushubwerkzeug nicht mehr ordnungsgemäß arbeiten kann oder im ungünstigsten Fall im Schlitz verloren geht.

Die Dichtungswand wird im Pilgerschrittverfahren (Abb. 11.5) hergestellt, d. h., den zunächst erstellten Primärlamellen 1 und 3 folgen zeitversetzt die Sekundärlamellen 2 und 4, welche durch teilweises Überschneiden der Primärlamellen eine geschlossene, homogene Wand bilden. Die Länge eines Abschnitts (Lamelle) wird durch die Öffnungsweite des Schlitzgreifers bestimmt. Es kann aber aufgrund der



**Abb. 11.5** Schematische Darstellung der Herstellung von Dichtschlitzwänden im Einphasenverfahren.

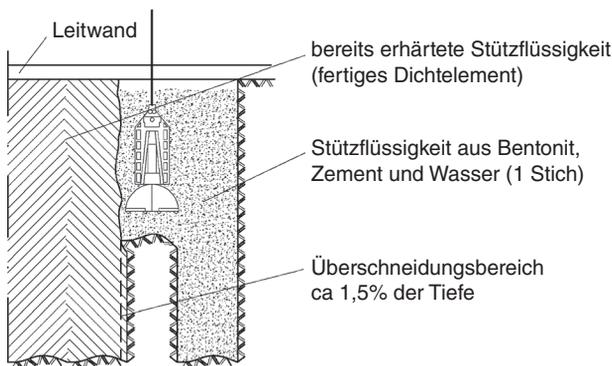
Aushubleistung und der örtlichen Verhältnisse sinnvoller sein, Schlitz mit mehrfacher Greiferbreite auszuheben. In einem solchen Fall (Abb. 11.6) ist es aufgrund der Herstellungsgenauigkeit wichtig, dass der Aushub immer jeweils am entfernten erdseitigen Ende des Schlitzes angefangen wird und der verbleibende Zwickel zwischen den bereits hergestellten Wandelementen zum Schluss ausgehoben wird. Mit dieser Vorgehensweise wird erreicht, dass sich eine Schiefstellung der bereits ausgehobenen Lamelle nicht auf die nachfolgenden überträgt.

Wird außer der dichtenden Funktion der Wand noch teilweise und temporär eine gewisse Biegesteifigkeit der Wand verlangt, so ist es auch möglich, in einem statisch beanspruchten Bereich Spundwandprofile oder sogar Stahlbetonfertigteile in den offenen Schlitz einzulassen (Abb. 11.2). Die Wände erhalten im oberen Teil eine *statische* und *dichtende* Funktion, im unteren Teil der Wand meist lediglich eine *dichtende* Wirkung.

Die statische Tragfähigkeit wird z. B. durch die Spundbohlen gesichert. Bei dem Nachweis der Gebrauchstauglichkeit sollte allerdings beachtet werden, dass an der Stelle, wo die Spundwand aufhört, die Verformungen so klein sein müssen, dass diese von der Dichtwandmasse ohne Rissbildung aufgenommen werden können. Hierzu bedarf es eines Verformungsnachweises für die ungünstigste Beanspruchung.

Die Vorteile des Einphasenverfahrens gegenüber dem Zweiphasenverfahren oder der Schmalwände liegen auf der Hand:

- Herstellung in einem Arbeitsgang,
- Anpassung der Zusammensetzung der Dichtwandmasse an die Bodenverhältnisse und die Abmessungen der Schlitzes sind jederzeit möglich,
- die Wand wird fugenlos hergestellt,
- aufgrund der hohen Plastizität der Dichtwandmasse ist diese relativ widerstandsfähig gegen mechanische Einwirkungen (es ist allerdings empfehlenswert, den Kopfbereich der Wand durch Magerbeton oder Schüttung zu schützen),
- geringe Wasserdurchlässigkeit,
- alterungsbeständig (auch beständig gegen kontaminierte Wässer),



**Abb. 11.6** Arbeitsweise bei kontinuierlichem Aushub, mit Schlitzelementbreite, welche ein Mehrfaches der Greiferbreite ist.

- gegenüber Dichtungsschmalwänden treten innerhalb der Dichtwandmasse geringe hydraulische Gefälle auf.

Um den Dichtigkeitsanforderungen der Wand gerecht zu werden, müssen sich die Schlitzwandlamellen überschneiden. Die Größe dieser Überschneidung ist abhängig von der Tiefe der Dichtungswand; sie liegt bei etwa 1,0–1,5 % der Tiefe. Die Überschneidung bereits fertig gestellter Dichtwandabschnitte setzt einen stichfähigen Zustand der eingebauten Dichtwandmasse voraus.

Die Entwicklung der Erstarrung einer frischen Bentonit-Zementsuspension wurde von Caron (1973) untersucht (Abb. 11.7). In Abbildung 11.7 sind die Ergebnisse von Viskositätsmessungen mit dem Marsch-Trichter für unterschiedliche Zeitpunkte nach Ansetzen der Mischung dargestellt. Ziel dieser Untersuchungen war es, die Erstarrungszeit der Dichtungsmasse festzustellen. Da nach etwa zwei Stunden der Erstarrungsprozess des Zements beginnt und dieser nur durch den Bentonitgehalt verzögert wird, darf der Schlitzaushub, bei dem die Suspension immer wieder in Bewegung gerät, eine bestimmte Zeitspanne (10–12 Stunden) nicht überschreiten. Andernfalls werden die Eigenschaften zum Nachteil verändert.

Mit Additiven kann man diesen Erstarrungsprozess verzögern, aber die Erfahrung zeigt, dass dieser Prozess anschließend umso schneller einsetzt.

Die Zusammensetzung einer Einphasen-Mischung unterscheidet sich von einer Zweiphasen-Mischung. Sie muss zwar eine niedrige Durchlässigkeit ( $\sim 10^{-8}$  m/sec) erreichen, aber sie muss keine so hohe Dichte wie die Zweiphasen-Mischung



**Abb. 11.7** Entwicklung der Viskosität einer Bentonit-Zement-Schlämme nach Caron (1973).

aufweisen, da keine Stützflüssigkeit bei einem „Betonvorgang“ verdrängt werden muss. Die Dichte von Einphasen-Mischungen erreicht Werte zwischen 1,1–1,25 t/m<sup>3</sup>.

Als Beispiel für die Zusammensetzung einer Einphasen-Mischung ist folgende Rezeptur für 1 m<sup>3</sup> Stützflüssigkeit gegeben:

Bentonit	30–45 kg
Zement CEM III/A 32,5 N	150–300 kg
Wasser	850–950 kg

Ein Überblick der Messungen der physikalischen Eigenschaften von Dichtwandmassen ist in der Tab. 11.1 angegeben.

**Tab. 11.1** Messung physikalischer Eigenschaften von frischen Dichtwandmassen.

Kennwert		Messgerät	Parameter
Dichte	[t/m <sup>3</sup> ]	Spülungswaage Hygrometer	hydrostatischer Druck
Viskosität (Auslaufzeit)	[s]	Marsh-Trichter	Verarbeitbarkeit <sup>1),2)</sup>
Filtratwasserabgabe	[cm <sup>3</sup> ]	Filterpresse (API) 7 bar, 7,5 min	Stabilität
Fileßgrenze	[N/m <sup>2</sup> ]	Pendelgerät	Stützwirkung
pH-Wert	–	Kugelharfe pH-Meter Messstreifen	

Messung physikalischer Eigenschaften von frischen Dichtwandmassen

1) Rührversuche bis 12 h zur Nachahmung des Greiferbetriebs

2) Erstarrungsverhalten z. B. mit Nadelgerät

Nachfolgend ist ein Zahlenbeispiel zur Ermittlung der Dichte einer Rezeptur angegeben.

Die Mischung besteht aus 30 kg Spezial-Bentonit, 150 kg Zement CEM III/A 32,5 N und 950 kg Wasser. Die Volumina und die Dichte sind der nachstehenden Tabelle 11.2 zu entnehmen:

**Tab. 11.2** Beispiel der Dichtebestimmung einer Mischung

	Masse (kg)	Stoffdichte $\rho_s$ (kg/l)	Volumen (l)
Bentonit	30 kg	2,65	11,3
Zement CEM III/A 32,5 N	150 kg	3,10	48,4
Wasser	9150 kg	1,00	940,0
	1130 kg		999,7

$$\text{Dichte } \rho = 1130/999,7 = 1,12 \text{ kg/l} = 1,12 \text{ t/m}^3$$