



Bauingenieur-Praxis

Theodoros Triantafyllidis

# Planung und Bauausführung in der Schlitzwand- und Dichtwandtechnik



## **Planung und Bauausführung in der Schlitzwand- und Dichtwandtechnik**



# Planung und Bauausführung in der Schlitzwand- und Dichtwandtechnik

*Theodoros Triantafyllidis*

**Autor:****Univ.-Prof. Dr.-Ing.habil. Dr. h.c.*****Theodoros Triantafyllidis***

Email: Theodoros.Triantafyllidis@kit.edu

**Titelbild**

Schlitzwandarbeiten, Baustelle Tunnel

Rastatt, Großprojekt Karlsruhe-Basel, 2023

Foto: Robin Weber, DB Netz AG

Alle Bücher von Ernst & Sohn werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung

**Bibliografische Information  
der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

©2025 Ernst & Sohn GmbH, Rotherstraße 21,  
10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

**Print ISBN:** 978-3-433-03340-1**ePDF ISBN:** 978-3-433-61084-8**ePub ISBN:** 978-3-433-61083-1**oBook ISBN:** 978-3-433-61082-4

**Umschlaggestaltung:** Petra Franke/Ernst & Sohn  
unter Nutzung eines Entwurfs von Sophie  
Bleifuß, Berlin

**Satz:** Newgen KnowledgeWorks (P) Ltd.,  
Chennai, India

**Druck und Bindung**

Gedruckt auf säurefreiem Papier

## 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 Schreibebeiten 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 Bau-praxis 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

Lutz Wichter, Wolfgang Meiniger

# Verankerungen, Vernagelungen und Mikropfähle in der Geotechnik

- Leitfaden für Bauherren, Planer und Ausführende
- Berücksichtigt alle aktuellen Regelwerke
- Zeigt Schadensmöglichkeiten auf

Das Buch gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Verankerungs- und Vernagelungstechnik. Es entstand aus der Tätigkeit der Autoren, die seit drei Jahrzehnten mit der Prüfung und Beurteilung von Verankerungen und Vernagelungen beschäftigt sind.



2., aktualisierte Auflage · 2022 · 212 Seiten ·  
180 Abbildungen · 31 Tabellen

Softcover

**ISBN 978-3-433-03249-7** € 55\*

eBundle (Print + ePDF)

**ISBN 978-3-433-03306-7** € 69\*

## BESTELLEN

+49 (0)30 470 31-236

marketing@ernst-und-sohn.de

[www.ernst-und-sohn.de/3249](http://www.ernst-und-sohn.de/3249)



# LEFFER

people · precision · performance

LEFFER Maschinen und Zubehör für den Spezialtiefbau:

- Verrohrungsmaschinen, Rohrdrehmaschinen und Abfangschellen
- Hydraulikaggregate
- Bohrrohre, Betonierrohre und Zubehör
- Freifallgreifer, Kugelgreifer und Fallmeissel
- Werkzeuge für alle Drehbohrverfahren
- Mechanische und Hydraulische Schlitzwandgreifer
- Abschallrohre und Flachfugenelemente
- Sondermaschinen



Hans LEFFER GmbH & Co. KG

Im Tierbachtal 28

66125 Saarbrücken

Tel./Fax: 068977930/06897793330

Internet: [www.leffer.de](http://www.leffer.de)

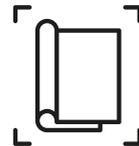
E-Mail: [info@leffer.de](mailto:info@leffer.de)

Hrsg.: DGGT – Deutsche Gesellschaft  
für Geotechnik e.V.

## Geotechnik

Die Zeitschrift für Bodenmechanik, Erd- und Grundbau, Felsmechanik, Ingenieurtechnologie sowie Kunststoffe in der Geotechnik und Umweltgeotechnik enthält neben themenspezifischen Fachbeiträgen zur u.a. europäischen Normung der Geotechnik auch Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik und deren Arbeitskreisen. Die im peer-review-Prozess begutachteten Inhalte bieten höchstes technisches und wissenschaftliches Niveau. Schwerpunktthemen sind: Bodenmechanik, Erd- und Grundbau, Neuigkeiten aus der Industrie.

**Ernst & Sohn**  
A Wiley Brand



**PROBEHEFT ANSCHAUEN**

+49 (0)30 470 31-236

[marketing@ernst-und-sohn.de](mailto:marketing@ernst-und-sohn.de)

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

**DGGT**   
Deutsche Gesellschaft  
für Geotechnik e. V.

## 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>



# 1

## Einführung

Thema dieses Buches zur „Planung und Bauausführung im Spezialtiefbau“ sind Schlitzwände und Dichtwände. Anker und Bohrpfähle sind weitere wichtige Elemente des Spezialtiefbaus und werden hier nicht behandelt sind jedoch in anderen Fachbüchern zu finden. Alle diese Elemente bilden jeweils eine Sparte im Spezialtiefbau. Für diese gelten, wie auch für alle anderen Gewerke des Spezialtiefbaus, einige Grundlagen der Qualitätssicherung, welche nachfolgend angesprochen werden.

Schlitzwände und Dichtwände, Anker und Bohrpfähle haben eine breite Anwendung im Spezialtiefbau. Diese Elemente können mit Hilfe mehrerer Methoden hergestellt werden und übernehmen sowohl temporäre als auch permanente Aufgaben bei der Herstellung von unterirdischen Bauwerken.

Schlitzwände dienen häufig als tragende Baugrubenwände und Dichtwände übernehmen eine dichtende Funktion, wobei Dichtwände in Sonderkonstruktionen, wie z. B. die Kombinationsdichtwand mit eingestellter Spundwand eine tragende Funktion – meist temporärer Art – übernehmen können. Von der Planung bis zur Ausführung von Schlitzwand- oder Dichtwandarbeiten ist eine Vielzahl unterschiedlichster Arbeitsschritte erforderlich, die, wenn sie nicht mit der entsprechenden Sorgfalt und Qualität vorgenommen werden, unweigerlich zu teilweise erheblichen Problemen technischer, wirtschaftlicher und juristischer Art führen können.

Letzte Entwicklungen im Spezialtiefbau und die Art der Vergabe von Bauleistungen im Bereich der Geotechnik haben zu Koordinationsproblemen oder sogar mangelndem Verständnis zwischen den Entwurfsverfassern, Erstellern von Leistungsverzeichnissen für Bauleistungen, Anbietern und Ausführenden sowie den Auftraggebern geführt. Das Ergebnis ist, dass die Abläufe einzelner Arbeitsschritte der Bauausführung unnötig gestört werden und Nachweise zu der mittlerweile als notwendig erachteten Qualitätssicherung verlangt oder angeboten werden, welche keine oder bestenfalls nur eine sehr begrenzte Aussagekraft haben.

Nicht selten kann eine angestrebte und vorgegebene Tiefbauaufgabe mit der ursprünglich angedachten Methode oder dem zunächst vorgesehenen Verfahren nicht mit der gewünschten Qualität gelöst werden und die daraus zwangsläufig entstehenden Auseinandersetzungen führen dann zu einem Rechtsstreit. Dann

wird eine juristische Lösung des entstandenen Problems gesucht, die mit einer sinnvollen ingenieurmäßigen Lösung nicht unbedingt etwas zu tun haben muss. Der volkswirtschaftliche Nutzen, speziell bei großen Vorhaben der öffentlichen Hand, unabhängig davon, wie die juristische Entscheidung ausfällt, ist immer negativ und die Kosten hat immer die Allgemeinheit zu tragen. Würde das Recht zu Gunsten des Auftraggebers sprechen, so ist bei den meisten mittelständischen Auftragnehmern im Spezialtiefbau mit einer Insolvenz oder mit einem Abbau des Personals zu rechnen, da die üblichen Gewinnmargen in der Baubranche solche Verluste nicht verkraften können. Die daraus entstehenden Kosten der Sozialsicherung trägt die Allgemeinheit. Im Falle der Rechtsprechung im Sinne der Nachtragsforderungen des Auftragnehmers ist aber auch die Allgemeinheit der Zahlende. Falls jedoch Qualitätsmerkmale zur Lösung der jeweiligen Aufgabe aufgestellt werden, welche klar und unmissverständlich bei der Vergabe definiert sind und deren Einhaltung auf der Baustelle der Prüfung und Überwachung mittels fachkundigen Personals seitens des Auftraggebers unterliegen, so ist bei der überwiegenden Mehrzahl der Fälle die Aufgabe im Sinne der Volkswirtschaft bestens zu lösen.

Die Qualitätssicherung ist also nicht mit einer unweigerlichen Erhöhung der Kosten verbunden, wie verschiedentlich behauptet wird, sondern ist ganz im Gegenteil bei Beibehaltung der objektiv gleichen Leistung mit der für die Allgemeinheit kostengünstigen Lösung verknüpft. Auf der anderen Seite darf man nicht erwarten, dass die Qualitätssicherung zum Nulltarif zu haben ist. Wenn man allerdings die Kosten einer Sanierung zur Herstellung einer geforderten Qualität eines anfänglich kostengünstig erscheinenden Angebotes hinzurechnet, welche bei Nichteinhaltung der Qualitätssicherung von Anfang an entstehen, dann ist es kostengünstiger, eine Sicherung der Qualität von Anfang an zu betreiben. Dies bedeutet andererseits, dass diese Qualitätssicherung sowohl den Auftragnehmer wie auch den Auftraggeber betrifft und vor allem von beiden Parteien zu verfolgen und einzuhalten ist. In die Pflicht genommen ist der Auftraggeber wie auch der Auftragnehmer. Die Einhaltung der Qualitätssicherung mag seitens des Auftraggebers auf den ersten Blick nicht einsichtig sein, da er schließlich eine Fachfirma beauftragt hat, aber in den meisten Fällen kann er sich dieser Verantwortung nicht entziehen, wie später noch erläutert wird.

Qualitätssicherung beginnt nicht, wenn die Baustelleneinrichtung und das Personal vor Ort sind, und auch nicht wenn die Leistungen bei der Erstellung des Leistungsverzeichnisses beschrieben werden, sondern viel früher. Sie beginnt eigentlich in den „Köpfen“ aller Beteiligten, u. a. auch des Auftraggebers. Das Bewusstsein des Bauherrn zur Qualitätssicherung verlangt, dass das Bauprodukt nicht nur lückenhaft sondern in seinem vollen Umfang vom Bauherrn hinsichtlich Zielsetzung und Funktionalität durchdacht ist. Seine Vorgaben kann in erster Linie der Architekt hinsichtlich der äußeren und inneren Gestaltung des Projektes visualisieren, zunächst einmal durch die Entwurfspläne. Diese können noch keine Bauhilfsmaßnahmen, wie z. B. die Baugrubenwände oder Gründungselemente (Fundamente oder Pfähle) berücksichtigen oder gar beinhalten, da diese weitere Kenntnisse über

die Situation vor Ort und besonders über den anstehenden Baugrund voraussetzen. Die zusätzliche Einbeziehung von Fachleuten, welche z. B. zuerst das Bodengutachten einschließlich Gründungsgutachten und dann die technischen Voraussetzungen einer Ausschreibung der entsprechenden Gewerke vornehmen und zusätzlich über mögliche Alternativen nachgedacht haben, ist ein weiterer wichtiger Schritt in Richtung Qualitätssicherung. Die möglichen Verfahrensalternativen zur Bewältigung der Bauaufgabe mit dem Durchspielen der Szenarien zur Machbarkeit bzw. der Überwindung aller zu diesem Zeitpunkt denkbaren bzw. bekannten Schwierigkeiten ist ein weiterer Bestandteil der Qualitätssicherung. Schließlich sollte in der Ausschreibung der Baumaßnahme der Wille des Bauherrn durch die klar umrissene Beschreibung des Projektes und die von ihm verlangten Qualitätsanforderungen formuliert sein, so dass seitens der Anbieter, wenn überhaupt, nur ein sehr begrenzter Interpretationsraum zur Verfügung steht, bestenfalls jedoch keiner.

Ebenso beginnt die Qualitätssicherung bei potentiellen Auftragnehmern in deren Köpfen und zwar bereits bei der Angebotsbearbeitung wie auch beim Vorbereiten von möglichen Varianten oder Alternativen der Bauausführung. Wichtiger Bestandteil außer der Schulung des Personals in einem Unternehmen muss der Wille zur Lieferung von Qualität sein, da dieser Wille den Fortbestand des eigenen Arbeitsplatzes sichert. Die Abläufe zum Erkennen von Fehlern müssen transparent und die Korrekturmaßnahmen wirksam sein, so dass eine Wiederholung von Fehlern möglichst unwahrscheinlich wird. Das Angebot muss entsprechend transparent und nachvollziehbar sein, wobei die jeweilige Leistung mit einer ausführlichen Arbeitsbeschreibung bei der Angebotsabgabe begleitet sein soll oder zumindest bei den Vergabeverhandlungen die entsprechenden Fachleute auf beiden Seiten und speziell auf der Bauherrnseite präsent sein müssen, um dieses Angebot von der Machbarkeit, der richtigen Verfahrensweise und bezüglich der Wirtschaftlichkeit prüfen zu können. Eine solche Vorgehensweise ist zwar für beide Seiten aufwendig und setzt ein hohes Maß an Ausbildung, Erfahrung und Sachkunde voraus. Die Erfahrung aber zeigt, dass dadurch Mehrkosten von späteren Nachträgen, von aufwendigeren, das normale Maß weit überschreitenden Beweissicherungsverfahren und Kosten durch entsprechende Beschäftigung von Gerichten größtenteils vermieden werden können. Eine solche Arbeitsweise bei der Angebotsbearbeitung und Vergabe hat sich in Deutschland noch nicht in der notwendigen Breite und Tiefe durchgesetzt, aber bei öffentlichen Großprojekten oder auch großen privaten Bauprojekten scheint diese Vorgehensweise unumgänglich zu sein, wenn man einen wirtschaftlichen Erfolg mit der entsprechenden Qualitätssicherung erreichen will.

## 1.1 Begriff Qualitätssicherung

Unter dem Begriff „Qualität“ versteht man die Summe der Eigenschaften oder Charakteristiken eines Produktes oder einer Dienstleistung in Relation zu seiner/

ihrer Fähigkeiten ausdrücklich definierte oder selbstverständliche Bedürfnisse zu befriedigen.

Wendet man diese Definition der Qualität bei einer Baumaßnahme an, bedeutet dies, dass die Qualität eigentlich der Bauherr durch seine vorgegebene Beschreibung der Baumaßnahme mit dem entsprechenden Entwurf und Ausschreibung vorgibt und diese Qualität innerhalb einer vorgegebenen oder vereinbarten Zeitspanne und innerhalb eines Kostenrahmens, welcher vom Bauherren akzeptiert wird, im Rahmen einer Baumaßnahme erreicht sein muss.

Unter dem Begriff Qualitätssicherung versteht man eine systematische und vorprogrammierte Vorgehensweise bei der Herstellung eines Produktes oder der Lieferung einer Leistung, welche eine ausreichende Sicherheit liefert, dass die geforderte Qualität erreicht wird oder erreicht werden kann.

Maßnahmen zur Qualitätssicherung haben in letzter Zeit eine negative Bewertung bekommen, da dieser Begriff überstrapaziert wurde, i. a. Geld kostet und für die Leistung auf der Baustelle zunächst hinderlich ist. Hinzu kommt ein bürokratischer Geschmack, da sehr viel protokolliert und dokumentiert werden muss. Auf der anderen Seite ist man bei gegebenenfalls notwendigen Beweissicherungen über die aufgenommenen Daten froh, da diese dazu dienen die Sachverhalte zu klären. Diese Daten sind aber ohne eine sorgfältige Qualitätssicherung nicht erhältlich und sogar nicht interpretierbar.

Man ist bestrebt, während der Bauausführung die ermittelten Daten von Messungen im Rahmen der Qualitätssicherung zu interpretieren und Schlüsse daraus zu ziehen. Bei unzureichender Interpretation sollte allerdings nicht versucht werden, diese Daten zu verwenden, um darauf aufbauend den Bauablauf zu stören oder gar zu stoppen. Besonders wenn die jeweiligen Messergebnisse nicht im Erwartungshorizont liegen, sind zuvor Fachleute zu konsultieren. Bei den meisten Großprojekten der letzten Jahrzehnte in Berlin haben die durchgeführten Qualitätssicherungsmaßnahmen mit den entsprechenden Messungen zu einer Verbesserung der Qualität geführt, so dass deren Einsatz in Zukunft nicht nur empfehlenswert sondern unverzichtbar ist.

## 1.2 Begriff Spezialtiefbau

Unter dem Begriff „Spezialtiefbau“ versteht man denjenigen Teil des Grundbaus bei dem das hergestellte Produkt sich so tief im Baugrund befindet, dass eine unmittelbare Einsichtnahme während der Herstellung und eine direkte Prüfung seiner Abmessungen sowie meistens der Funktionsfähigkeit nicht möglich sind. Man ist vielmehr bei den Spezialtiefbauprodukten auf indirekte Methoden der Prüfung des hergestellten Produktes im Baugrund angewiesen. So können z. B. Flachfundamente, Plattengründungen, Winkelstützmauern oder Stützmauern allgemein nicht zu den Produkten des Spezialtiefbaus gezählt werden. Man kann allerdings in diesem Fall von Tiefbau sprechen, da die Abmessungen der Produkte direkt einsehbar

und direkt prüfbar sind. Die Abmessungen von Spezialtiefbauprodukten können teilweise nach erfolgtem Aushub festgestellt werden, z. B. im Zuge von Unterfangungs- oder Unterfahrungsmaßnahmen von Gebäuden. So sind z. B. eine HDI-Unterfangung oder Abschnitte von Wurzelpfählen im Zuge des Aushubes direkt einsichtbar. Diese direkte Einsicht ist während der Herstellung des jeweiligen Spezialtiefbauproduktes verwehrt und meist bekommt man diese Produkte zu sehen, wenn ihre Funktion nicht mehr erforderlich ist. Dieser besondere Umstand verlangt nicht nur geschultes Personal oder spezielle Maschinen sondern auch spezielles Wissen, welches über das im Tiefbau übliche hinausgeht. Deshalb kann man vom Spezialtiefbau sprechen.

Vermehrt wird unter dem Begriff Spezialtiefbau erwartet, dass hier alle Spezialkenntnisse, Verfahren und Geräte vorhanden sind, so dass man mit allen Schwierigkeiten einer Spezialtiefbaumaßnahme zurechtkommt, unabhängig davon, wie genau die ursprüngliche Aufgabe definiert war. Manche Auftraggeber ziehen sich auf dieses Verständnis des Begriffes zurück, um eine funktionale Vergabe von Bauleistungen in der Geotechnik oder im Spezialtiefbau zu rechtfertigen und jede Nachtragsforderung abzuwehren, wenn die gestellte Bauaufgabe nun nicht wie erhofft kostengünstig mit einer angedachten Lösung bei den vorliegenden Bodenverhältnissen bewältigt werden. Dieser Begriff wurde oft missbraucht, um das sog. „Baugrundrestisiko“ zu Lasten des Spezialtiefbauers zu verschieben, obwohl dieses auf der Seite des Bauherren verlagert ist, da er diesen Untergrund als Baustoff zur Verfügung stellt. Hier darf nicht vergessen werden, dass der Baugrund mit seinen Eigenschaften auch Bestandteil des zu erstellenden Bauwerkes ist.

Zweifelsohne verfügt der Spezialtiefbau über Kenntnisse, Geräte und Verfahren, die sich eignen, entweder tief in dem Baugrund etwas herzustellen oder den Baugrund zu vergüten. Diese Arbeiten differieren allerdings stark voneinander, wenn die vorgefundenen Verhältnisse nicht denjenigen entsprechen, die beim Entwurf zugrunde gelegt wurden. Für einen Nicht-Fachmann scheinen diese Unterschiede nicht gravierend zu sein (z. B. Vergütung der Leistungen in einem dichten oder in einem sehr dichten Boden) aber die Anstrengungen für den Ausführenden sind so ungleichmäßig groß, dass hierfür auch eine andere Vergütung seiner Leistungen angemessen ist. Es ist deshalb immer von Vorteil, wenn bei den Erkundungsarbeiten, wie auch bei der Gründungsberatung, alle die notwendigen Parameter so präzise wie nur möglich ermittelt und angegeben werden, so dass unangenehme Überraschungen für alle beteiligten Partner ausbleiben. Die Qualität dieser so bedeutenden Arbeitsschritte hat in letzter Zeit leider nachgelassen (z. B. bei Ausschreibungen werden sehr große Bandbreiten über Bodenklassen und Eigenschaften vom Baugrund angegeben), da über die Maßen hinaus versucht wird Zeit, Aufwand und Kosten für die Baugrundbeschreibung zu reduzieren, so dass sehr viele Bauverträge als Streitfälle vor dem Gericht enden. Sicherlich verteuert diese Vorgehensweise die Baumaßnahme, ohne die Qualität des Produktes zu verbessern.

### 1.3 Qualitätssicherung im Spezialtiefbau

Aufgrund der vorangegangenen Erläuterungen wird auch deutlich, dass die Herstellung von Produkten, welche nicht direkt einsehbar und erfassbar sind, eine intensive Qualitätssicherung verlangt, um den gestellten Anforderungen gerecht zu werden. Man ist gezwungen, Maßnahmen zu ergreifen, die indirekt Informationen über den Herstellungsprozess liefern sowie Messverfahren zu benutzen, um Lage und Abmessungen des Produktes zu bestimmen. Trotz aller dieser Maßnahmen darf man nicht vergessen, dass das Spezialtiefbauprodukt maßgeblich durch den zur Verfügung gestellten Baugrund bestimmt wird. Eine so weitreichende wie auch nur erdenkliche Qualitätssicherung wird nicht zur erwünschten Qualität des Produktes beitragen können, wenn der Baugrund nicht richtig für die Belange der jeweiligen Baumaßnahme beschrieben und erfasst wird, so dass das verwendete Verfahren optimal auf den jeweiligen Baugrund eingestellt werden kann. Das Spezialtiefbauprodukt ist ein Resultat des vorliegenden Baugrundes und des Spezialtiefbauverfahrens einschließlich der eingebrachten Materialien. Eine nicht richtige und/oder unzureichende Beschreibung und Erfassung des Baugrundes führt zwangsläufig zu einem Produkt im Spezialtiefbau, bei dem nicht erwartet werden kann, dass seine Eigenschaften den Geplanten entsprechen. Das gleiche gilt selbstverständlich auch, wenn das vorgesehene Verfahren nicht richtig angewendet wird oder wenn Materialien verwendet werden, welche sich nicht für die jeweilige Anwendung eignen. Die Qualitätssicherung im Spezialtiefbau ist also nicht nur notwendig sondern Bestandteil des Spezialtiefbauverfahrens selbst, welches zugrunde gelegt wird.

Die Qualitätssicherung im Spezialtiefbau erfordert auch speziell hierfür geschultes Personal, so dass diese Arbeiten nur von im jeweiligen Gewerbe speziell geschulten Mitarbeitern ausgeführt werden können. Hier sind neben den Behörden auch die Fachfirmen in der Pflicht für die Weiterbildung der Mitarbeiter zu sorgen und nicht darauf zu hoffen, fertig geschultes Personal abzuwerben.

Viele der in diesem Buch angegebenen Verfahren der Qualitätssicherung für die Schlitzwand- und Dichtwandtechnik sind nicht selbstverständlich und können nicht als Bestandteil eines Bauvertrages angesehen werden, es sei denn diese werden explizit vereinbart und detailliert dargestellt. Die üblichen Maßnahmen zur Sicherung der Qualität eines Spezialtiefbaugewerkes werden in der VOB und in den entsprechenden DIN-Regeln oder in den zusätzlichen technischen Vorschriften beschrieben. Bei jedem Vertrag im Spezialtiefbau muss die jeweilige Qualitätssicherung sehr detailliert angegeben sein und es darf nicht vorausgesetzt werden, dass alles, was man in diesem Buch beschrieben findet, a priori oder selbstverständlicherweise jedem Vertrag zugrunde liegt und als Bestandteil der jeweiligen Spezialtiefbauleistung zu betrachten ist.

Diese Leistungen, welche zur Qualitätssicherung erbracht werden, müssen gesondert ausgeschrieben sein und sind immer als besondere Leistungen zu betrachten, womit auch ein Anspruch auf eine separate Vergütung besteht.

## 2

## Schlitzwandtechnik

### 2.1 Geschichtliches zur Entwicklung der Schlitzwandbauweise

Im städtischen Tiefbau waren Bohlträgerwände und Bohrpfahlwände als Verbauwände seit langem bekannt, bevor die Schlitzwände seit Anfang der 50er- Jahre des 20. Jahrhunderts ins Leben gerufen wurden. Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass die Entwicklungen der Schlitzwandbauweise ihre Ursprünge in der Bohrpfahltechnik haben.

Auf den Erfahrungen mit Bohrspülungen für Tiefbohrungen (etwa seit 1845) basierend, wurde 1912 das erste Patent für Schlitzwände erteilt, welches die Erkenntnis ausnutzte, dass wässrige Tonsuspensionen eine stabilisierende Wirkung auf unverrohrte Bohrlochwände ausüben. Die Firma „Carl Brand“ in Düsseldorf hat durch die „Patentschrift Nr. 265150 Klasse 84c Gruppe 2“ vom Kaiserlichen Patentamt am 14.03.1912 Schutzrechte für ein „Verfahren zur Herstellung von Pfeilern, Pfählen und dgl. zu Tiefbauzwecken unter Benutzung des im Bergbau üblichen Dickspülverfahrens“ erworben. Dieses Patent wie auch später ein US-Patent mit der Nr. 2048710 von Ranney im Jahre 1936 mit dem Titel „Verfahren zum Bau unterirdischer Bauwerke und Geräte hierzu“ gerieten in Vergessenheit. Die Gründe hierzu liegen vermutlich in dem damaligen Stand der Technik des Stahlbetonbaus, da das Wissen unter Dickspülung zu betonieren nicht weit reichte und man Angst hatte, die Bewehrung (Stahleinlagen der Schlitzwand) in eine Tonsuspension zu stellen.

Eine Art Renaissance erlebte die Schlitzwandtechnik als Lorenz (1950) in der Zeitschrift BAUTECHNIK im Jahre 1950 einen Aufsatz über die Verwendungsmöglichkeiten thixotroper Flüssigkeiten im Grundbau veröffentlichte. Eine Reihe solcher Möglichkeiten ließ er bis 1951 patentieren (Lorenz 1950/1951) und seine Erfahrungen mit thixotropen Flüssigkeiten hat er in der Zeitschrift BAUTECHNIK veröffentlicht (Lorenz 1953). Parallel dazu erhielt Veder (1950) im Jahre 1950 ein österreichisches Patent auf ein Verfahren zur Herstellung wasserdichter Wände durch Aneinanderreihen von unverrohrten Bohrungen, welche in einer Dickspülung hergestellt und anschließend ausbetoniert werden.

Seit dieser Zeit folgte eine Flut von Veröffentlichungen über die grundbautechnischen Anwendungen von Tonsuspensionen zur Stützung von freistehenden Erdwänden (Grewe 1965; Grodde 1963) und es wurden in den folgenden Jahren immer bedeutendere Schlitzwandbauwerke errichtet (Veder 1966). Mit den gesammelten Erfahrungen wurden Schlitzze mit Längen zwischen 4 m bis 11 m hergestellt (Franke (1954); Jäger (1955); Killer (1958); Jakob (1959a, 1959b, 1968); Neumeuer (1961); Franke (1963); Veder (1959)), wobei in Berlin sogar ein Belastungsversuch an einem 12 m langen Schlitz ausgeführt wurde Niemann (1960). Die Schlitzwandbauweise wurde im großen Umfang im U-Bahnbau eingeführt, vor allem in Mailand 1956 gelang es der Firma ICOS zum ersten Mal ohne Vorbohrungen (runde unverrohrte Bohrungen am jeweiligen Ende des Schlitzes) mit Hilfe eines Spezialgreifers, der als Vorläufer des heutigen Schlitzwandgreifers bezeichnet werden kann (Führungskorb, Seilwinde), einen Schlitz herzustellen. Etwa sechs Jahre später (1962) wurde in Deutschland ein neuartiges Saugbohrgerät entwickelt, die „Salzgitter-Saugfräsanlage SF 20“, welche als Vorläufer der heutigen Frästechnik in der Schlitzwandbauweise angesehen werden kann. Allerdings konnte dieses Gerät sich nicht durchsetzen, da es nicht universell einsetzbar war und die Entsandung große Flächen für Absatzbecken erforderlich machten, wobei auch die Aufbereitung und Trennung der gebrauchten Bentonitsuspension vom Aushub nicht zufriedenstellend war.

Die ersten Schlitzwände in der Bundesrepublik wurden 1959 und 1960 in Berlin und München hergestellt, wobei ICOS als Bauunternehmen mit einer Veder-Lizenz agierte. Trotz des vorsichtigen Herantastens bei der Anwendung der Schlitzwandbauweise, zuerst mit überschnittenen Bohrpfählen, später mit Schlitzten, gab es auch negative Erfahrungen (Veder 1981), die leider bis heute mancherorts wiederholt gemacht werden.

Die Schäden bei der Herstellung von Wänden unter Tonsuspensionen können wie folgt wiedergegeben werden:

- keine Überschneidung der einzelnen Pfähle bei einer Bohrpfahlwand, ab etwa 35 m Tiefe (Qualitätssicherung der Lagegenauigkeit fehlt!)
- ausgedehnte Löcher in der Schlitzwand mit freiliegender Bewehrung in verschiedenen Tiefen (entweder keine ausreichende innere oder äußere Standsicherheit, oder kein ausreichender lichter Abstand der Bewehrung, geringe Betonsteigmaße oder zu schnelles Ziehen der Betonierrohre)

Trotz der vielen Veröffentlichungen in den 50er- und Anfang der 60er- Jahre, blieb die Wirkungsweise dieser Tonsuspensionen unbekannt. Wenn man die Beobachtungen und Erklärungen dieser Publikationen resümiert, so stellt man fest, dass diese Flüssigkeiten geradezu wunderbare Eigenschaften haben müssten, so dass sie sich in jeder Situation anders verhalten. In den meisten Fällen wurde jedoch das Gegenteil dessen bewirkt, was der Suspension an anderer Stelle als Leistung zugerechnet wurde.

Über die Stützung der Tonsuspensionen in Bodenschlitzen herrschte Unkenntnis und außer der Aufnahme von Erddruckkräften und Ausbildung von hydrostatischen Kräften hatte man der Suspension noch weitere „geheimnisvolle“ Kräfte zugebilligt, ohne diese physikalisch (z. B. Elektroosmose) begründen zu können und experimentell ihre Wirkung quantifizieren zu können.

Die ersten wissenschaftlichen Abhandlungen zur Standsicherheit flüssigkeitsgestützter Erdwände und zur Technologie der stützenden Flüssigkeiten wurde von Weiß (1964, 1967) und kurz davor von Veder (1963) veröffentlicht.

Außer der bekannten Regel, dass der Erddruck den hydrostatischen Druck der stützenden Flüssigkeit nicht übersteigen darf, hat Veder (1963) folgende Schlüsse aufgrund von Labortests wie auch von 1:1 Feldversuchen gezogen:

- Beim Aushub eines Schlitzes bildet sich ein Filterkuchen an der Wandung. Dieser Filterkuchen ist im Allgemeinen undurchlässig und ist gebunden mit dem Boden, so dass die Stützflüssigkeit den vollen hydrostatischen Druck auf den Boden entlang der Wandung ausüben kann.
- Die Bildung des Filterkuchens wird stark vom Grad der Stabilität der Suspension beeinflusst, von der Eindringung in die Poren und ihrer Fähigkeit zur Gelbildung in diesen Poren und vielleicht von einigen elektroosmotischen Phänomenen. Der Filterkuchen bildet eine Art Verputz an der Wandung, so dass die individuellen Körner des Bodens miteinander verbunden werden und dadurch in ihren relativen Positionen gehalten werden.
- Die Bewegung des Aushubgerätes im Schlitz fördert die Tränkung des Bodens mit Bentonitsuspensionen in der unmittelbaren Umgebung des Schlitzes, so dass die Bildung des Filterkuchens erleichtert wird.

Ähnlich kam Weiß zu folgender Schlussfolgerung hinsichtlich der Wirkung von Stützflüssigkeiten, welche er in zwei Fälle unterschieden hat:

- Die Flüssigkeit, die auch als Boden mit flüssiger Konsistenz betrachtet werden kann, verhält sich in groben Bodendporen wie eine homogene, stabile Flüssigkeit. Dann ist die Ursache der stützenden Wirkung die in der Flüssigkeit vorhandene Kohäsion  $c_u$  im bodenmechanischen Sinn, wobei gleichzeitig der Winkel der inneren Reibung  $\varphi_u = 0$  ist. Mit Rücksicht auf den Sprachgebrauch in der Rheologie wird die Kohäsion stützender Flüssigkeiten in der zeitlich nachfolgenden Literatur als Fließgrenze  $\tau_f$  bezeichnet. Sie verhindert das unbegrenzte Eindringen der Flüssigkeit in die Bodendporen und die Bewegung einzelner Bodenkörner in der Flüssigkeit, und sie bewirkt die Einleitung des hydrostatischen Flüssigkeitsdruckes in den Boden.
- Die als Dispersion vorliegende Flüssigkeit ist gegenüber dem System der Bodendporen inhomogen und instabil, weil die Partikelgröße der dispersen Phase größer als der Porendurchmesser ist. Der kennzeichnende Vorgang ist dann die Filtration. Die feste Phase der Flüssigkeit sondert sich an den Poreneingängen als Filterkuchen ab, die flüssige fließt durch den Filterkuchen in die Poren ein. Die

Flüssigkeiten müssen also einen möglichst dichten Filterkuchen erzeugen und damit einen weiteren Zerfall der Flüssigkeit durch das Abfließen der flüssigen Komponente verhindern.

Zwischen 1965 und 1985 entstanden sehr viele Arbeiten auf der Forschungs- wie auch der baupraktischen Ebene über mehrere Fragestellungen zur Wirkung der thixotropen Suspension auf Erdschlitz und der damit verbundenen Fragen der Standsicherheit. Hierzu zählen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) die Arbeiten von Möbius (1977); Möbius und Günther (1973, 1977); Möbius u. a. (1976), die auf die Eigenschaften von Bentonit-Suspensionen und auf Modellversuche von flüssigkeitsgestützten Erdwänden zielten. Gleichzeitig sind Müller-Kirchenbauer (1972a, 1972b, 1977) und Müller-Kirchenbauer und Walz (1980) Fragen der Standsicherheit von suspensionsgestützten Schlitzten nachgegangen. Die Berechnung des räumlichen Erddruckes nach der Elementscheibentheorie wurden von Walz und Hock (1987), Walz und Prager (1978, 1979) sowie der Flüssigkeitsstützung (Walz 1989) und der rechnerischen Standsicherheit von Walz und Pulsfort (1983) vorangetrieben bis sie schließlich Eingang in die Deutsche Normung (DIN 4126) gefunden haben. Ebenso Eingang in die Normung fanden auch die Arbeiten von Weiß (1962, 1965, 1969), die Belange der Baupraxis der Schlitzwandbauweise betrachteten, wie z. B. den Ansatz für den Wandreibungswinkel von in Bentonitsuspension hergestellten Betonwänden, die Druckverluste von Suspensionen in Rohrleitungen und weitere Sicherheitsfragen der Schlitzwandbauweise. Das Kontaktverhalten von suspensionsgestützten Ortbetonwänden mit dem anstehenden Baugrund wird durch die Anreicherung des Filterkuchens mit den Bodenfeinpartikeln beeinflusst, die unwesentlich von der Standzeit des offenen Schlitzes ist, bleibt Gegenstand aktueller Forschung (Arwanitaki u. a. 2007; Arwanitaki 2009; König und Schröder 2015, 2017).

Parallel zum Anwachsen der Erkenntnisse und Erfahrungen über die Stützwirkung der Suspensionen entwickelte sich auch die Technologie, so dass es im Jahre 1961 möglich wurde, Bentonitsuspensionen nach einer Regeneration wieder zu verwenden. Zur Abtrennung von Sand und Schluff aus der verwendeten Suspension wurden Separieranlagen mit Sieben und Zyklonen entwickelt und eingesetzt.

Nach dieser Zeit wurden Geräte mit höherer Leistung gebaut und selbst bei Aushubgeräten und Greifern wurden die Anforderungen über die Aushubgenauigkeit erhöht, wie auch die Leistungen verbessert. Weitere Entwicklungen führten dann zu längeren und schwereren Greifern für eine bessere Einhaltung der Vertikalität und für eine größere Aushubleistung aufgrund von mehrfachen Scherungen des Seils und des erhöhten Eigengewichts.

Hydraulikgreifer und seit den 70er Jahren Schlitzwandfräsen wurden entwickelt, um höhere Leistungen des Aushubes zu ermöglichen. Die neuesten Geräte sind mit Elektronikkomponenten bestückt, so dass Angaben zur Lagegenauigkeit des Schlitzes, Suspensionsspiegel, Aushubtiefe etc. direkt beim Aushub ohne eine Unterbrechung des Betriebes möglich sind.

Trotz der Erkenntnisse des Verhaltens der Suspensionen und der technischen Entwicklungen, welche auch die Qualitätssicherung erleichtern, wurden in der Vergangenheit Schäden produziert, deren Ursache eine fehlende intensive ingenieurtechnische Kontrolle war (Weiß 1979).

Übliche Fehler waren zunächst folgende:

– **Sandeinschlüsse in der Schlitzwand über die Gesamtdicke**

Diese können durch Manipulation an der stützenden Flüssigkeit, z. B. durch Zugabe von Wasser, damit während des Betoniervorganges das Abpumpen der vom Beton verdrängten Flüssigkeit erleichtert werden soll, entstehen. Diese Wasserzugabe führt zum Ausfallen des in der Flüssigkeit dispergierten Sandes, so dass großvolumige Sandeinschlüsse über die ganze Wanddicke die Folge sind.

Eine fehlerhafte Ermittlung des Betonspiegels und zu geringe Eintauchtiefe der Betonierrohre oder ein zu schnelles Ziehen dieser Rohre führt ebenfalls zu großvolumigen Sandeinschlüssen.

Eine nicht ausreichende Entsandung der stützenden Flüssigkeit führt dazu, dass der aufsteigende Beton die „schwere“ Stützflüssigkeit nicht verdrängt, sondern umschließt.

– **Vermischung von Stützsuspension mit Beton**

Während der Anfänge kam es beim Betonieren unter Dickspülung wiederholt zu Einschlüssen von stützender Flüssigkeit im Beton und demzufolge zu einer unzureichenden Betongüte. Die Gründe lagen entweder in der Verwendung unzulässiger Tonarten oder an der Benutzung von Betonierrohren, die nicht wasserdichte Kupplungen aufgewiesen haben. Die Nichteinhaltung der jetzt bekannten Betonierregeln führte damals zu den Problemen der nicht akzeptablen Betongüte (Kontraktorverfahren, nicht ausreichend fließfähiger Beton etc.).

– **Mangelhafte Betondeckung und Einschlüsse von Suspensionen in Kreuzungen von Bewehrungsstäben**

Zu Beginn mangelte es an der genauen Kenntnis der Bewehrungsanordnung für Schlitzwände. Speziell die Vermeidung von Bewehrungskonzentrationen in den Bereichen von Stößen oder in den Bereichen von Ankerdurchführungshülsen oder sich kreuzenden Bewehrungen wurde nicht in Relation zu den Viskositätseigenschaften und Fließigenschaften der Suspension gesehen. Das Resultat war, dass der nach oben steigende Beton an diesen Stellen nicht mit ausreichender Geschwindigkeit fließen konnte und es demzufolge zum Einschluss von stützender Flüssigkeit kam, da in anderen Bereichen der Betonspiegel schnell anstieg und diese Stelle überdeckt wurde. Da die Steiggeschwindigkeit auch im Bereich zwischen Aushubwand und Bewehrung nicht ausreichend war, führte dies zu einer mangelhaften Betondeckung der Bewehrungslagen.

Ein Beispiel, bei dem die ausführende Firma auf die besondere Bewehrungsführung bei Schlitzwandarbeiten den Auftraggeber hinwies und die entsprechenden Kosten der Auftraggeber nicht tragen wollte, ist noch bei Weiß (1993) zu finden.

Der Auftraggeber war aus Kostengründen nicht bereit, die notwendige „lichte Durchflussweite zur Sicherung der Betondeckung“ (Begriff siehe DIN 4126, Ausgabe August 1986, Abschnitt 8.2, Absatz 1) auf beiden Seiten der Schlitzwand zuzugestehen. Das Bauunternehmen wählte deshalb auf der Außenseite der Schlitzwand eine ausreichende lichte Durchflussweite; für die Innenseite blieb ein zu geringer Rest mit dem erwarteten Ergebnis, dass dort die Bewehrung auf großen Flächen frei lag und durch Spritzbeton saniert werden musste. Die unglückselige, aber üblicherweise dem Preiswettbewerb unterworfenen „Betondeckung“ blieb auf Jahre, nämlich bis zum Erscheinen des Normenentwurfes DIN 4126 im Jahre 1981, heißes Diskussionsthema und war immer wieder Ursache für Schäden mit an den Wandoberflächen frei liegender Bewehrung bei uneinsichtigen Auftraggebern.

Daraus erkennt man, dass auch der Auftraggeber bereit sein muss, eine Qualität nicht nur zu verlangen, sondern entsprechend zu honorieren. Entsprechend ist auch die Pflicht des Auftragnehmers auf die Qualitätsunterschiede hinzuweisen, wenn er es für erforderlich hält.

In der Zwischenzeit haben größtenteils alle Erkenntnisse der Vergangenheit ihren Niederschlag in den Normen und Empfehlungen gefunden und deren Einhaltung ist nicht mehr optional sondern obligatorisch. Gleichzeitig hat sich die Maschinenteknik im Bereich der Aushubgeräte inkl. der Fräsen weiterentwickelt wie auch die Hilfsgeräte zur Messung und rechtzeitiger Meldung eventueller Abweichungen. Während der Herstellung der Schlitzwände wird es aber notwendig bleiben, nicht eindeutige Messungen und nicht redundante Messergebnisse mit Ingenieurverstand zu interpretieren.

Die Entwicklung von Fräsen mit Führungskorb und Seilaufhängung hat nun zu Aushubtiefen geführt, die bis 150 m reichen. Die durch die Fräse mögliche kontinuierliche anstatt der intermittierenden Förderung des Greifers hat speziell bei großen Aushubtiefen eine wesentliche Zeitersparnis gebracht. Voraussetzung für das Funktionieren der Schlitzwandfräse ist allerdings, neben der Homogenität des auszuhebenden Bodens hinsichtlich Festigkeit (z. B. keine Findlinge), die kontinuierliche und schnelle wie auch vollständige Trennung des Aushubs von der Bentonitsuspension. Regenerationsanlagen mit Sieben und Zyklonanlagen werden erforderlich, die dies ermöglichen und den Aushub in relativ trockenem Zustand auswerfen. Man muss dabei bedenken, dass diese Anlagen einen entsprechenden Bedarf an Baustelleneinrichtungsfläche benötigen, der jedoch nicht immer vorhanden ist. Von Fall zu Fall muss also die Entscheidung neu überdacht werden, je nachdem ob die erforderliche Schlitzwandfläche (bzw. Leistung) den Einsatz des Greifer- oder Fräsverfahrens sinnvoll erscheinen lässt.

## 2.2 Einsatzgebiete

Schlitzwände sind Wände im Untergrund aus Stahlbeton, Beton oder anderen vornehmlich zementgebundenen Stoffen, die statisch tragende und/oder abdichtende und/oder abschirmende Funktion haben und die sich sowohl für temporäre (Bauhilfskonstruktionen) als auch für permanente (endgültiges Bauwerksbestandteil) Zwecke eignen.

Diese Wände werden in flüssigkeitsgestützten Schlitzten begrenzter Länge im Boden nach dem Kontraktorverfahren (Ortbetonschlitzwand) elementweise hergestellt. Schlitzwände können aber auch aus Betonfertigteilen (Fertigteil-Schlitzwand) hergestellt werden (ähnlich wie die Stahlelemente bei Spundwänden). Durch Aneinanderreihen von Elementen entsteht eine durchlaufende Wand. Andere Konstruktionen, z. B. Schächte mit Kreisquerschnitt oder Stützen mit T-Querschnitt können aus Kombinationen von Elementen gebildet werden. Abb. 2.1 zeigt einige Anwendungsgebiete der Schlitzwandbauweise

Als tragende Konstruktion sind die Schlitzwände nicht nur zur Aufnahme von normal zur Wandflächen wirkenden horizontalen Erd- und Wasserlasten, sondern auch zur Aufnahme von parallel zur Wand wirkenden Lasten (z. B. zur Übertragung vertikaler Lasten in den Boden) geeignet.

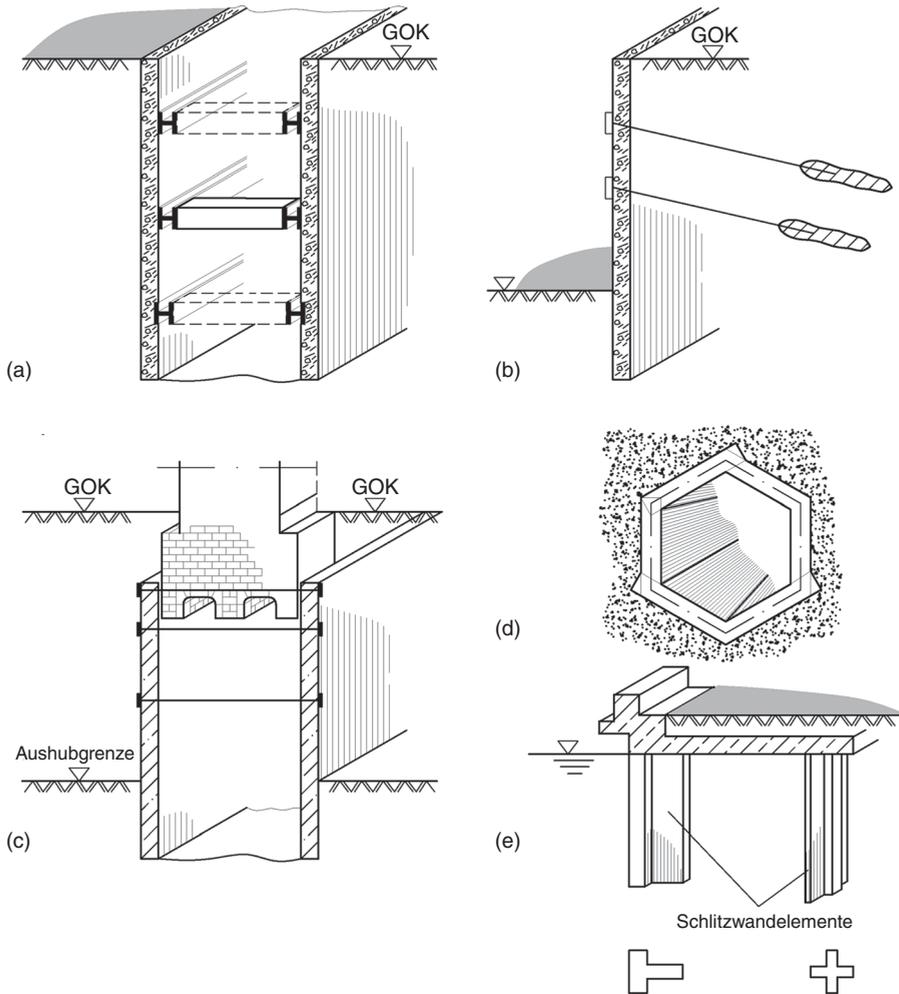
Schlitzwände werden bevorzugt für Baugruben des städtischen Tiefbaus eingesetzt (Loers und Pause 1976; Pause und Hillerseim 1975; Winter 1970, 1971), wie z. B. für den Tunnelbau (in offener Bauweise oder in der „Wand-Deckel“-Bauweise in sehr vielen Großstädten weltweit).

Die wesentlichen Vorteile von Schlitzwänden sind:

- Minimierung des Aushubs nur auf die Kubatur des tragenden Baukörpers (wie auch bei Bohrpfahlwänden),
- eine GW-Absenkung zur Herstellung ist im Allgemeinen nicht unbedingt erforderlich,
- geringe Verformung der Wände bei der Aufnahme von horizontalen und vertikalen Lasten,
- Herstellung von „wasserdichten“ Baugruben mit einer minimalen Anzahl von Fugen,
- unmittelbar vor Gebäuden herstellbar und demzufolge platzsparend,
- größere Leistung in m<sup>2</sup> als z. B. bei Bohrpfahlwand ist möglich und dadurch verkürzt sich die Bauzeit,
- Wirtschaftlichkeit der Konstruktion, falls die Schlitzwände als Bestandteil des Bauwerkes einbezogen werden.

Die wesentlichen Nachteile sind:

- Die Schlitzwand ist im Vergleich zur Spundwand, Bohrpfahlwand oder zum Trägerbohlwandverbau hinsichtlich Baustelleneinrichtung und Materialverbrauch



**Abb. 2.1** Beispiele für Anwendungen der Schlitzwandbauweise: (a) Tunnel in offener Bauweise, (b) rückverankerte Verbauwand einer Baugrube, (c) Unterfangung von Gebäuden, (d) Schacht mit Schlitzwandelementen, (e) Schlitzwandelemente für die Gründung einer Pier-Konstruktion.

aufwendiger. Zudem müssen gebrauchte Stützflüssigkeiten und mit Suspension verunreinigtes Aushubmaterial gesondert entsorgt werden. Bei kleinen Verbauwandflächen, geringen Tiefen und beengten Platzverhältnissen ist die Schlitzwand meist unterlegen. Als Alternative könnte eine Bohrpfehlwand oder eine Trägerbohlwand oder eine Spundwand – je nach Aufgabenstellung – infrage kommen.

- Aussparungen für durchquerende Leitungen oder Kanäle sind häufig problematisch, da das System verglichen mit der Pfehlwand unflexibler ist.