

DIN EN 14679

**DIN**

ICS 93.020

**Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) –  
Tiefreichende Bodenstabilisierung;  
Deutsche Fassung EN 14679:2005**

Execution of special geotechnical works –  
Deep mixing;  
German version EN 14679:2005

Exécution des travaux géotechniques spéciaux –  
Colonnes de sol traité;  
Version allemande EN 14679:2005

Gesamtumfang 56 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

## **Nationales Vorwort**

Diese Europäische Norm wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 288 „Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau)“ (Sekretariat: AFNOR, Frankreich, Vorsitz: DIN, Deutschland) in der Arbeitsgruppe WG 10 „Tiefreichende Bodenstabilisierung“ mit schwedischer Federführung ohne deutsche Mitarbeit erarbeitet. Im DIN Deutsches Institut für Normung e. V. existiert kein entsprechender Spiegelausschuss; die Norm wurde dem NABau-Arbeitsausschuss 05.08.00 „Injektionen, Düsenstrahlverfahren, tiefreichende Bodenstabilisierung“ zugeordnet.

**Deutsche Fassung**

**Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten  
(Spezialtiefbau) —  
Tiefreichende Bodenstabilisierung**

Execution of special geotechnical works —  
Deep mixing

Exécution des travaux géotechniques spéciaux —  
Colonnes de sol traité

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 28. Februar 2005 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG  
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION  
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

**Management-Zentrum: rue de Stassart, 36 B-1050 Brüssel**

# Inhalt

	Seite
Vorwort.....	4
1 Anwendungsbereich.....	5
2 Normative Verweisungen .....	5
3 Begriffe.....	6
4 Notwendige Angaben für die Ausführung der Arbeiten.....	9
4.1 Allgemeines .....	9
4.2 Besondere Erfordernisse .....	9
5 Baugrunduntersuchungen .....	10
5.1 Allgemeines .....	10
5.2 Spezifische Informationen .....	10
6 Baustoffe und Bauprodukte .....	11
6.1 Allgemeines .....	11
6.2 Besondere Überlegungen .....	12
7 Entwurfskriterien.....	12
7.1 Allgemeines .....	12
7.2 Zusätzliche Entwurfskriterien.....	13
7.3 Wahl des Bindemittels und der Zusatzmittel .....	13
7.4 Mischen im Labor und <i>in-situ</i> sowie Prüfungen des behandelten Bodens .....	13
7.5 Bemessungsunterlagen .....	14
8 Ausführung.....	15
8.1 Technischer Bericht.....	15
8.2 Vorbereitung der Baustelle .....	15
8.3 Feldversuche .....	16
8.4 Ausführung .....	16
8.4.1 Allgemeines .....	16
8.5 Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung .....	16
8.6 Tiefreichende Bodenstabilisierung .....	16
8.6.1 Allgemeines .....	16
8.6.2 Trockenmischverfahren .....	17
8.6.3 Nassmischverfahren .....	18
8.7 Einbau der Bewehrung .....	18
9 Bauüberwachung, Prüfungen und Kontrollen .....	19
9.1 Allgemeines .....	19
9.2 Bauüberwachung .....	19
9.3 Prüfungen .....	19
9.4 Kontrollen .....	20
9.4.1 Ausführungsphase.....	20
9.5 Verhalten des behandelten Bodens .....	20
9.6 Weitere Aspekte .....	20
10 Aufzeichnungen .....	21
10.1 Aufzeichnung während der Arbeiten .....	21
10.2 Aufzeichnung nach Abschluss der Arbeiten .....	21
11 Besondere Anforderungen.....	21
11.1 Allgemeines .....	21
11.2 Sicherheit .....	22
11.3 Umweltschutz .....	22
11.4 Einfluss auf angrenzende Bauwerke.....	22

	Seite
<b>Anhang A (informativ) Praktische Aspekte der tiefreichenden Bodenstabilisierung .....</b>	<b>23</b>
<b>A.1 Einleitung.....</b>	<b>23</b>
<b>A.2 Anwendungsbereich.....</b>	<b>23</b>
<b>A.3 Ausführung.....</b>	<b>23</b>
<b>A.3.1 Allgemeines.....</b>	<b>23</b>
<b>A.3.2 Trockenmischverfahren .....</b>	<b>25</b>
<b>A.3.3 Nassmischverfahren.....</b>	<b>29</b>
<b>A.3.4 Einbauraster.....</b>	<b>32</b>
<b>A.3.5 Hybridtechniken .....</b>	<b>34</b>
<b>A.4 Herstellungsbezogene Überlegungen .....</b>	<b>36</b>
<b>Anhang B (informativ) Aspekte der Bemessung.....</b>	<b>38</b>
<b>B.1 Allgemeines.....</b>	<b>38</b>
<b>B.1.1 Anwendungsbereich.....</b>	<b>38</b>
<b>B.1.2 Anwendung .....</b>	<b>38</b>
<b>B.2 Bemessungsgrundsätze .....</b>	<b>38</b>
<b>B.3 Ausführung der tiefreichenden Bodenstabilisierung .....</b>	<b>40</b>
<b>B.4 Auswahl des Bindemittels .....</b>	<b>41</b>
<b>B.5 Prüfung .....</b>	<b>41</b>
<b>B.5.1 Allgemeines.....</b>	<b>41</b>
<b>B.5.2 Laborprüfungen .....</b>	<b>41</b>
<b>B.5.3 Felduntersuchungen .....</b>	<b>43</b>
<b>B.6 Korrelation zwischen verschiedenen Eigenschaften von behandeltem Boden.....</b>	<b>45</b>
<b>B.6.1 Festigkeit in der Natur und im Labor .....</b>	<b>45</b>
<b>B.6.2 Beziehung zwischen den mechanischen Eigenschaften und der einachsialen Druckfestigkeit .....</b>	<b>47</b>
<b>B.7 Aspekte der Planung .....</b>	<b>47</b>
<b>B.7.1 Stabilität.....</b>	<b>47</b>
<b>B.7.2 Setzungen.....</b>	<b>50</b>
<b>B.7.3 Einkapselung.....</b>	<b>51</b>
<b>Anhang C (informativ) Verbindlichkeitsgrad der Festlegungen.....</b>	<b>52</b>
<b>Literaturhinweise .....</b>	<b>53</b>

## **Vorwort**

Dieses Dokument (EN 14679:2005) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 288 „Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau)“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom AFNOR (Frankreich) gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Oktober 2005, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Oktober 2005 zurückgezogen werden.

Das Dokument wurde ausgearbeitet, um neben EN 1997-1 und prEN 1997-2 zu stehen. Dieses Dokument deckt die Erfordernisse der Ausführung und Überwachung ab und befasst sich mit der Planung nur soweit erforderlich.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

## 1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt die allgemeinen Grundlagen für die Ausführung, Kontrolle, Überwachung und Aufzeichnung der tiefreichenden Bodenstabilisierung fest, wobei zwischen zwei verschiedenen Verfahren unterschieden wird: das Trockenmischverfahren und das Nassmischverfahren.

Die tiefreichende Bodenstabilisierung ist nach diesem Dokument auf Verfahren mit folgenden Eigenschaften beschränkt:

- a) Mischung durch rotierende mechanische Mischwerkzeuge (siehe Anhang A, Bild A.1), wobei die horizontale Stützung durch den umgebenden Boden nicht beseitigt wird;
- b) Behandlung des Bodens bis in eine Tiefe von mindestens 3 m;
- c) unterschiedliche Geometrien und Anordnungen, bestehend aus einzelnen Säulen, Mehrfachelementen, Rastern, Blöcken, Wänden oder Kombinationen von mehr als einer Einzelsäule, überschritten oder allein stehend (siehe Anhang A, Bilder A.8 bis A.12);
- d) Behandlung von gewachsenem Boden, Auffüllung, Müllablagerungen und Schlämmen usw.;
- e) andere Bodenverbesserungsverfahren, die ähnliche Techniken verwenden (siehe A.3.5).

Hinweise zu praktischen Aspekten der tiefreichenden Bodenstabilisierung betreffend Ausführungstechniken und Ausrüstung werden in Anhang A gegeben. Hauptanwendungen werden in Anhang A, Bild A.14 veranschaulicht. Prüfverfahren und die Beschreibung und Festlegung von Bemessungsparametern werden in Anhang B vorgestellt, soweit sie durch die Ausführung beeinflusst werden.

## 2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 196-1, *Prüfverfahren für Zement — Teil 1: Bestimmung der Fertigkeit*

EN 196-2, *Prüfverfahren für Zement — Teil 2: Chemische Analyse von Zement*

EN 196-3, *Prüfverfahren für Zement — Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit*

EN 196-4, *Prüfverfahren für Zement — Teil 4: Quantitative Bestimmung der Bestandteile*

EN 196-5, *Prüfverfahren für Zement — Teil 5: Prüfung der Puzzolanität von Puzzolanzementen*

EN 196-6, *Prüfverfahren für Zement — Teil 6: Bestimmung der Mahlfineinheit*

EN 196-7, *Prüfverfahren für Zement — Teil 7: Verfahren für die Probenahme und Probenauswahl von Zement*

EN 196-8, *Prüfverfahren für Zement — Teil 8: Hydratationswärme — Lösungsverfahren*

EN 196-21, *Prüfverfahren für Zement — Teil 21: Bestimmung des Chlorid-, Kohlenstoffdioxid- und Alkalianteils von Zement*

EN 197-1:2000, *Zement — Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement*

EN 197-2:2000, *Zement — Teil 2: Konformitätsbewertung*

## EN 14679:2005 (D)

EN 451-1, *Prüfverfahren für Flugasche — Teil 1: Bestimmung des freien Calciumoxidgehalts*

EN 459-1, *Baukalk — Teil 1: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien*

EN 459-2, *Baukalk — Teil 2: Prüfverfahren*

EN 791:1995, *Bohrgeräte — Sicherheit*

ENV 1991, *Eurocode 1: Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke*

ENV 10080, *Betonbewehrungsstahl — Schweißgeeigneter gerippter Betonstahl B 500 — Technische Lieferbedingungen für Stäbe, Ringe und geschweißte Matten*

EN 12716, *Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) — Düsenstrahlverfahren (Hochdruckinjektion, Hochdruckbodenvermörtelung, Jetting)*

prEN 1997-1, *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik — Teil 1: Allgemeine Regeln*

prEN 1997-2, *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik — Teil 2: Laborversuche für die geotechnische Bemessung*

EN ISO 14688-1, *Geotechnische Erkundung und Untersuchung — Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Böden — Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14688-1:2002)*

EN ISO 14688-2, *Geotechnische Erkundung und Untersuchung — Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Böden — Teil 2: Grundlagen der Klassifizierung (ISO 14688-2:2004)*

EN ISO 14689-1, *Geotechnische Erkundung und Untersuchung — Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels — Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14689-1:2003)*

## 3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

### 3.1

#### **Zusatzmittel**

en: admixture

fr: additive, addition

Dispergierungsmittel, Verflüssiger, Verzögerer

### 3.2

#### **Bindemittel**

en: binder

fr: liant

chemische reagierende Materialien (Kalk, Zement, Gips, Hochofenschlacke, Flugasche, usw.)

### 3.3

#### **Bindemittelgehalt**

en: binder content

fr: teneur pondéral en liant

Gewicht des eingebrachten trockenen Bindemittels bezogen auf die Volumeneinheit des zu behandelnden Bodens

### 3.4

#### **Bindemittelfaktor**

en: binder factor

fr: dosage volumique de liant

Verhältnis des Gewichts von eingebrachtem trockenem Bindemittel zum Trockengewicht des zu behandelnden Bodens

### 3.5

#### **Flügelumdrehungsindex**

en: blade rotation number

fr: nombre de rotation d'aile

Gesamtzahl der Flügelumdrehungen des Mischwerkzeuges je Meter bewegter Welle

### 3.6

#### **Säule**

en: column

fr: colonne

*in situ* durch einen einzelnen Herstellungsvorgang unter Verwendung eines Mischwerkzeugs hergestellter Körper aus behandeltem Boden. Das Mischwerkzeug und der Herstellungsprozess bestimmen die Form und Größe des Querschnittes einer Säule

### 3.7

#### **Trockenmischverfahren**

en: dry mixing

fr: malaxage par voie sèche

Prozess bestehend aus mechanischer Zerlegung des Bodens *in situ* und dessen Vermischung mit Bindemittel mit oder ohne Füller und Zusatzmitteln in trockener Pulverform

### 3.8

#### **Füller**

en: filler

fr: fines inerte, charge inerte

ein nicht reagierendes Material (Sand, Kalksteinmehl usw.)

### 3.9

#### **Mischungsenergie**

en: mixing energy

fr: energie de malaxage

verwendete Rohstoffe zum Betreiben der Geräte

### 3.10

#### **Mischvorgang**

en: mixing process

fr: processus de malaxage

Vorgang, der die mechanische Zerlegung der Bodenstruktur und die Verteilung von Bindemitteln und Füllern im Boden umfasst

### 3.11

#### **Mischwerkzeug**

en: mixing tool

fr: outil de malaxage

Werkzeug zur Zerlegung des Bodens, Verteilung und Vermischung des Bindemittels mit dem Boden, bestehend aus einer oder mehreren rotierenden Einheiten, die mit verschiedenen Flügeln, Armen oder Paddeln mit/ohne durchgehenden oder nicht durchgehenden Schnecken ausgerüstet sind (siehe Anhang A)

**3.12**

**Abbohrvorgang**

en: penetration (downstroke)

fr: enfoncement (descente de l'outillage)

jener Teil des Mischvorgangs, in welchem das Mischwerkzeug auf die erforderliche Tiefe gebracht wird und die erste Vermischung und Verflüssigung des Bodens stattfindet

**3.13**

**Abbohr- bzw. Ziehgeschwindigkeit**

en: penetration or retrieval speed

fr: vitesse d'enfoncement ou de remontée

vertikale Bewegung des Mischwerkzeugs je Zeiteinheit während des Abbohr- oder Ziehvorgangs

**3.14**

**Abbohr- bzw. Ziehrate**

en: penetration or retrieval rate

fr: vitesse d'enfoncement ou de remontée par tour

vertikale Bewegung des Mischwerkzeugs je Umdrehung der rotierenden Einheit(en) während des Abbohr- und Ziehvorgangs

**3.15**

**Ziehvorgang**

en: retrieval (upstroke)

fr: remontée (montée de l'outillage)

jener Teil des Mischvorgangs, in welchem die abschließende Vermischung und das Herausziehen des Mischwerkzeugs stattfinden

**3.16**

**wiederholter Mischvorgang**

en: restroke

fr: re-malaxage

ein wiederholter Mischvorgang ist ein zusätzlicher Abbohr- und Rückziehzyklus des Mischwerkzeugs zur Erhöhung des Bindemittelgehaltes und/oder der Säulenhomogenität

**3.17**

**Umdrehungsgeschwindigkeit**

en: rotation speed

fr: vitesse de rotation

Anzahl der Umdrehungen der rotierenden Einheit(en) des Mischwerkzeugs je Zeiteinheit

**3.18**

**Mischvorgang**

en: stroke

fr: malaxage

ein kompletter Zyklus des Mischvorgangs

**3.19**

**Volumenverhältnis**

en: volume ratio

fr: teneur volumique en coulis

Verhältnis von injiziertem Suspensionsvolumen (beim Nassmischen) zum Volumen des zu behandelnden Bodens

**3.20**

**Wasser/Bindemittel-Verhältnis**

en: water/binder ratio

fr: rapport eau/liant

das Gewicht von Wasser und trockenem Bindemittel dividiert durch das Gewicht des trockenen Bindemittels

**3.21****Nassmischverfahren**

en: wet mixing

fr: malaxage par voie humide

Verfahren bestehend aus mechanischer Zerlegung des Bodens *in situ* und seiner Vermischung mit einer Suspension bestehend aus Wasser, Bindemittel mit oder ohne Füller und Zusatzmitteln

**4 Notwendige Angaben für die Ausführung der Arbeiten****4.1 Allgemeines**

**4.1.1** Vor Ausführung der Arbeiten müssen alle erforderlichen Informationen zur Verfügung gestellt werden.

**4.1.2** Diese Informationen sollten enthalten:

- a) alle gesetzlichen oder rechtlichen Einschränkungen;
- b) die Lage der Hauptachsen für die Aussteckung;
- c) der Zustand von Bauwerken, Wegen, Einbauten usw. in der Umgebung der Arbeiten;
- d) ein angemessenes Qualitätsmanagementsystem, einschließlich Bauüberwachung, Prüfung und Kontrollen.

**4.1.3** Zu den Baustellenbedingungen sollten, soweit relevant, folgende Informationen gegeben sein:

- a) die Geometrie der Baustelle (Randbedingungen, Topographie, Zugang, Böschungen, Höhenbeschränkungen usw.);
- b) vorhandene unterirdische Einbauten, Versorgungsleitungen, bekannte Kontaminationen und archäologische Beschränkungen;
- c) Umweltbeschränkungen, einschließlich Lärm, Vibration, Verschmutzung;
- d) zukünftige oder laufende Bauaktivitäten, wie Wasserhaltung, Tunnelbau, tiefe Baugruben.

**4.2 Besondere Erfordernisse**

**4.2.1** Folgende Informationen müssen darüber hinaus zur Verfügung gestellt werden:

- a) vorangegangene Erfahrungen mit tiefreichenden Bodenstabilisierungsarbeiten oder besonderen geotechnischen Arbeiten in der Nachbarschaft der Baustelle, einschließlich der Ergebnisse von Feldversuchen, um die Bemessungsannahmen zu bestätigen;
- b) Kontaminationen oder Gefährdungen im Untergrund, die einen Einfluss auf die Ausführungsart, Arbeitssicherheit oder die Entsorgung von Aushubmaterial von der Baustelle haben können.

**4.2.2** Folgende Anweisungen müssen gegeben werden:

- a) Berichtsprozedur für den Fall, dass unvorhergesehene Umstände eintreten oder Verhältnisse, die sich von den Bemessungsannahmen unterscheiden;
- b) Berichtsprozedur, falls eine Beobachtungsmethode in der Bemessung zum Einsatz kommt;
- c) Bekanntgabe aller Einschränkungen, wie z. B. abschnittsweise Arbeitsdurchführung, die von der Bemessung verlangt werden;
- d) ein Plan für alle Test- und AbnahmeprozEDUREN für Materialien, die bei den Arbeiten zur Verwendung kommen.

**4.2.3** Jede zusätzliche oder abweichende Forderung über die Bestimmungen in diesem Dokument hinaus muss vor Beginn der Arbeiten formuliert und einvernehmlich geregelt werden.

## **5 Baugrunduntersuchungen**

### **5.1 Allgemeines**

**5.1.1** Die Tiefe und das Ausmaß von Untersuchungen müssen ausreichen, um die Baugrunderkundung in Übereinstimmung mit den Anforderungen nach EN 1997-1 zu ermöglichen.

**5.1.2** Labor- und Felduntersuchungen müssen mit EN 1997-2 und den betreffenden Europäischen Normen EN 196-1 bis -8, EN 196-21, EN 197-1 und -2, EN 451, EN 459-1 und -2, ENV 10080, EN 12716, EN 791 und EN ISO 14689-1 übereinstimmen.

**5.1.3** Relevante Erfahrungen mit der Ausführung vergleichbarer tiefreichender Bodenstabilisierungsarbeiten unter ähnlichen Verhältnissen in der Nachbarschaft der Baustelle müssen in die Überlegung einbezogen werden, wenn das Ausmaß der Baugrunderkundungen festgelegt wird.

**5.1.4** Das Baugrundgutachten muss gemeinsam mit allen vorhandenen Informationen, die für die Verfahrensauswahl relevant sind, zur Verfügung gestellt werden.

**5.1.5** Bohrlöcher oder Schürfe müssen angemessen verschlossen werden, damit Grundwasserströmungen und/oder nachfolgende Ausführungen der tiefreichenden Bodenstabilisierungssäulen und deren Verhalten nicht beeinträchtigt werden.

### **5.2 Spezifische Informationen**

**5.2.1** Die Beschreibung und Klassifizierung von Böden muss EN ISO 14688-1 und EN ISO 14688-2 entsprechen.

**5.2.2** Neben der allgemeinen geologischen Beschreibung und den in EN 1997-1 aufgelisteten Punkten muss das Baugrundgutachten die folgenden, die Bodenverhältnisse betreffenden Angaben für die Ausführung der tiefreichenden Bodenstabilisierung enthalten:

- a) die Zusammensetzung, flächenmäßige Ausdehnung, Dicke und Festigkeit der Oberflächenschicht, Baumwurzeln, Auffüllungen usw.;
- b) das Vorhandensein von Findlingen oder Blöcken, verfestigten Schichten oder darunter liegendem Fels, welche bei der Ausführung Probleme verursachen oder spezielle Methoden oder Werkzeuge erforderlich werden können;
- c) Vorhandensein von quellenden Böden (Montmorillonit);
- d) Höhlen, Hohlräume oder Klüfte;
- e) Druckniveau des Grundwassers, dessen Schwankung und mögliche artesischen Drücke.

**5.2.3** Soweit relevant, sollten die folgenden zusätzlichen Informationen zur Verfügung gestellt werden:

**5.2.3.1** Physikalische Eigenschaften und Zustandseigenschaften:

- a) Konsistenzgrenzen;
- b) Klassifizierung;
- c) Dichte;

- d) Korngrößenverteilung;
- e) Mineralogie;
- f) natürlicher Wassergehalt;
- g) organische Anteile.

**5.2.3.2** Mechanische Eigenschaften:

- a) Verformung und Konsolidation;
- b) Festigkeit (Scher-, Druck-, Zugfestigkeit);
- c) Durchlässigkeit.

**5.2.3.3** Umwelttechnische, chemische und biologische Eigenschaften:

- a) Grundwasserqualität (z. B. Kontamination, Aggressivität, Chemismus, pH-Wert, Art und Konzentration von Ionen und Metallen (Referenzmessungen));
- b) Daten aus Kontaminationsuntersuchung;
- c) Auswaschungsversuche (Löslichkeitstests).

**5.2.4** Die Höhe und Lage jedes einzelnen Aufschluss- oder Testpunkts sollten relativ zum bekannten nationalen Bezugssystem oder zu einem fixierten Referenzpunkt festgelegt werden.

## **6 Baustoffe und Bauprodukte**

### **6.1 Allgemeines**

**6.1.1** Die Ausführung der tiefreichenden Bodenstabilisierung umfasst das Einbringen eines Bindemittels und, falls erforderlich, einer oder mehrerer der folgenden Komponenten in den Boden:

- a) Zusatzmittel;
- b) Wasser;
- c) Füller;
- d) Bewehrung.

**6.1.2** Alle Baustoffe und Bauprodukte für die Verwendung bei der tiefreichenden Bodenstabilisierung müssen mit den relevanten Europäischen Normen übereinstimmen. Wo die betreffenden Europäischen Normen nicht verfügbar sind, muss die Verwendung von Baustoffen und Bauprodukten im Einklang mit den nationalen Normen und/oder Richtlinien stehen.

**6.1.3** Alle verwendeten Baustoffe und Bauprodukte müssen den lokalen Umweltbestimmungen entsprechen.

**6.1.4** Alle verwendeten Baustoffe und Bauprodukte müssen mit den Bemessungsanforderungen übereinstimmen.

**6.1.5** Für nicht in vorhandenen Normen enthaltene Baustoffe müssen geeignete Versuche durchgeführt werden, um die Übereinstimmung mit den Festlegungen der Bemessung sicherzustellen.

**6.1.6** Die Bezugsquellen von Baustoffen müssen dokumentiert werden und dürfen nicht ohne vorherige Bekanntgabe verändert werden.

## **6.2 Besondere Überlegungen**

**6.2.1** Wasser, das nicht aus der bekannten Trinkwasserversorgung stammt, muss untersucht werden, um die Eignung für die vorgesehene Verwendung festzustellen.

**6.2.2** Umwelttechnisch bedeutende Spuren chemischer Substanzen können in Baustoffen und Bauprodukten als übliche Verunreinigung vorhanden sein und die Untersuchung ihrer Umwelteinflüsse kann erforderlich sein.

## **7 Entwurfskriterien**

### **7.1 Allgemeines**

**7.1.1** Die *In-situ*-Festigkeit von Säulen wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst wie z.B. die Eigenschaften des zu behandelnden Bodens, die Verhältnisse bei der Mischung, Mischwerkzeuge und Mischprozess, Lagerbedingungen, Art und Menge des Bindemittels, Bodenverhältnisse usw. Deshalb kann die präzise Abschätzung der Festigkeit in der Natur zum Bemessungszeitpunkt schwierig sein. Wichtig ist die Abschätzung und Verifizierung der Festigkeit in der Natur in verschiedenen Phasen durch Mischprüfungen im Labor, gesammelte Erfahrung, Feldversuche und Nachweisprüfungen. Die Bemessung sollte angepasst werden, wenn die Anforderungen nicht erfüllt werden können.

**7.1.2** Die Durchführung von Projekten mit tiefreichenden Bodenstabilisierung beinhaltet geotechnische Bemessungen in mehreren Phasen und kann ein iterativer Prozess sein. Ziel der Planung ist die Bereitstellung technischer Unterlagen, die der Erstellung von Bauten mit Hinblick auf deren Sicherheit, Nutzbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Dauerhaftigkeit unter Berücksichtigung der erwarteten Lebensdauer dienen. Es wird empfohlen, die für die Bemessung verantwortlichen Personen auch in die Ausführung mit einzubeziehen.

**7.1.3** Die geotechnische Planung von tiefreichenden Bodenstabilisierungs-Projekten muss auf der Grundlage der ENV 1991, EN 1997-1 und EN 1997-2 erfolgen. Der informative Anhang B fasst wichtige Kenngrößen zusammen, die die Gesamtstabilität und Setzung des behandelten Bodens betreffen.

**7.1.4** Ein Verweis auf relevante Erfahrungen ist zulässig, sofern ein entsprechender Nachweis stattgefunden hat (z. B. durch Rammsondierungen, Pressiometerversuche oder andere Prüfungen).

**7.1.5** Eine detaillierte Verfahrensbeschreibung der tiefen Bodenstabilisierung muss erstellt werden. Als Mindestanforderung muss die Beschreibung den Ort und Zweck der Arbeiten enthalten, die erforderliche Lebensdauer, mögliche Beschränkungen während der Ausführungsphase und alle mit der Ausführung der Arbeiten verbundenen Gefahren.

**7.1.6** Wenn ein gewisser Spielraum bei der Auswahl von Materialien besteht, muss der technische Bericht die besonderen Anforderungen enthalten, die die endgültige Auswahl beeinflussen können.

**7.1.7** Eine erste überschlägige Bemessung kann auf der Basis von im Labor gemischten Proben und vergleichbaren Erfahrungen erfolgen, wobei der Unterschied der Kennwerte zwischen Laborproben und *in situ* behandeltem Boden zu berücksichtigen ist.

**ANMERKUNG** Zur Orientierung wird auf Anhang B verwiesen.

**7.1.8** Versuche können zuweilen nicht ausreichend sein, um die Eignung der Bodenverbesserung zu verifizieren. Eine geeignete Bauaufsicht, Überwachung und Aufzeichnungen sind erforderlich. Ein Beobachtungsansatz ist oft zielführend und die Planung ist üblicherweise nicht abgeschlossen, bevor auf der Baustelle gesammelte Erfahrungen vorliegen.

## 7.2 Zusätzliche Entwurfskriterien

**7.2.1** Belastungsverhältnisse, klimatische Bedingungen und Grundwasserverhältnisse müssen ebenso berücksichtigt werden wie zulässige Grenzen von Setzungen, Hebungen und Verdrehungen von Bauwerken und Einbauten, die durch die tiefreichenden Bodenstabilisierungsarbeiten betroffen sein können.

**7.2.2** Die Bemessung sollte Umwelteinflüsse auf die Bauausführung identifizieren und berücksichtigen, wie z. B. Lärm, Vibrationen, Verschmutzung von Wasser und Luft sowie Einflüsse auf benachbarte Einrichtungen.

**7.2.3** Wo eine Lastabtragung der Säule über Spitzendruck verlangt ist, muss die Verwendung eines geeigneten Mischwerkzeugs und Mischprozesses vorgeschrieben werden, um die Ausbildung einer Schwächezone am Säulenfuß zu vermeiden.

**7.2.4** Der Entwurf von Säulen oder Wänden und die Toleranzen sollten die Einschränkungen durch die Mischausrüstung berücksichtigen.

**7.2.5** Für Raster, Blöcke oder überschnittene Säulen sollte der planmäßige Abstand zwischen den Säulen die Winkelabweichung und Lagetoleranzen berücksichtigen.

**7.2.6** Änderungen, die durch unvorhergesehene Umstände wie wesentliche Veränderung der Boden- oder Grundwasserverhältnisse notwendig werden, müssen unverzüglich angezeigt werden.

**7.2.7** Geeigneter Schutz und Überprüfungen sollten eingeplant werden, wenn behandelte Böden voraussichtlich Frost-/Tauzyklen ausgesetzt werden.

**7.2.8** Auswirkungen aufgrund der Beanspruchung von Säulen durch chemische und physikalische Effekte müssen in der Planung berücksichtigt werden. Spezielle Überlegungen hinsichtlich der Langzeitfestigkeit sind in Meeresnähe oder bei kontaminierten Böden erforderlich.

## 7.3 Wahl des Bindemittels und der Zusatzmittel

**7.3.1** Bei der Wahl des Bindemittels sind die Baustellen- und Bodenbedingungen sowie die Art und Eigenschaften des zu behandelnden Bodens zu berücksichtigen.

**7.3.2** Die Wirksamkeit des Bindemittels und des Zusatzmittels ist durch Laborprüfungen und/oder Feldversuche des behandelten Bodens zu untersuchen, wobei die Festlegungen nach 7.4 zu berücksichtigen sind.

## 7.4 Mischen im Labor und *in-situ* sowie Prüfungen des behandelten Bodens

**7.4.1** Da die Eigenschaften des behandelten Bodens von zahlreiche Faktoren einschließlich des Herstellungsprozesses beeinflusst werden, sind Vorversuche und Prüfungen des behandelten Bodens durchzuführen, um die Einhaltung der Bemessungsanforderungen zu bestätigen.

**7.4.2** Bei der Untersuchung von behandeltem Boden sollte berücksichtigt werden, dass Ergebnisse aus Laborprüfungen die in der Natur erreichbaren Ergebnisse übertreffen können (beispielsweise hervorgerufen durch sorgfältigeres Mischen im Labor und unterschiedliche Lagerungsbedingungen).

**7.4.3** Bei der Untersuchung des Herstellungsvorgangs und der Eigenschaften von behandeltem Boden sollte die Verbesserung des Bodens mit der Zeit berücksichtigt werden. Der Verbesserungsfortschritt hängt von der Art und Menge des verwendeten Bindemittels sowie von den Lagerungsbedingungen ab. Wird der Zeitfaktor bei Mischproben im Labor untersucht, müssen die Lagerungsbedingungen berücksichtigt werden (Temperatur, Lagerung unter Wasser, Vorbelastung usw.).

**7.4.4** Reihenfolge und Geschwindigkeit der Ausführung, Ansteifungs- und Aushärtungszeit sowie der Säulendurchmesser müssen berücksichtigt werden, um ein lokales Versagen des Bodens oder unzulässige Setzungen oder Hebungen zu vermeiden.

**7.4.5** Wo die tiefreichende Bodenstabilisierung zur Schadstoffimmobilisation oder zur Stabilisierung von Abfällen oder zu ähnlichen Zwecken verwendet wird, bei denen unvorhersehbare Wechselwirkungen zwischen Bindemittel und dem vorhandenen Material auftreten können, müssen projektspezifische Untersuchungsprogramme durchgeführt werden.

## **7.5 Bemessungsunterlagen**

**7.5.1** Das Ergebnis der Bemessung sollte das angestrebte Verhalten und die Geometrie der Behandlung darlegen, sowie die Beschreibung von Materialien und Produkten, wie sie in der Bemessung berücksichtigt wurden und alle weiteren Einzelheiten wie Arbeitsphasen und, soweit relevant, folgende Informationen:

- a) Festlegungen für die tiefreichende Bodenstabilisierung;
- b) Säulenanforderungen (Festigkeits- und Verformungseigenschaften und Durchlässigkeit);
- c) die Breite der Überschneidungszone zwischen benachbarten Säulen;
- d) Toleranzen der Säulen bezüglich Länge, Durchmesser, Neigung und Lage;
- e) Randbedingungen und Geometrie des Einbaus, Absteckpläne;
- f) Bauablaufplan einschließlich Zeitplan für die Belastung und eine mögliche Vorbelastung und Angabe aller für die Planung erforderlichen Beschränkungen, wie z. B. Konstruktionsphasen;
- g) Plan aller Prüf- und Abnahmeverfahren für Materialien, die für die Arbeiten verwendet werden, sowie alle erforderlichen Kontrollen und Überwachungen während der Ausführung;
- h) Anforderungen bezüglich möglicher Bewehrung (Klasse der Materialien und Einbauverfahren) und Zeitplan für deren Einbau;
- i) Einbindung in eine tragfähige oder undurchlässige Schicht;
- j) Berichtsverfahren für unvorhergesehene Umstände oder Bedingungen, die von den Bemessungsannahmen abweichen oder, für den Fall, dass ein Beobachtungsverfahren übernommen wurde.

**7.5.2** Falls die Abnahme der Arbeiten auf der Grundlage von Prüfungen an Kernproben festgelegt wird, muss die Planung den Ort, das Alter zum Prüfzeitpunkt, die Kernbohrausrüstung und das -verfahren vorschreiben.

**7.5.3** Für mechanische Versuche an behandeltem Boden müssen die Versuchsbedingungen der Proben und Abnahmekriterien für die Proben definiert werden. Toleranzen bezüglich der Versuchsparameter müssen die Eignung der vorgeschlagenen Versuchsverfahren wie in Anhang B beschrieben berücksichtigen, insbesondere, wenn diese Verfahren indirekt sind.

**7.5.4** Grenzwerte von kritischen geotechnischen Bemessungsparametern müssen ebenso festgelegt werden wie die zu ergreifenden Maßnahmen, wenn diese Werte möglicherweise überschritten werden.

**7.5.5** Alle zusätzlichen oder abweichenden Anforderungen innerhalb der Zuständigkeit dieser Norm, sind vor Beginn der Arbeiten festzulegen und zu vereinbaren.

## 8 Ausführung

### 8.1 Technischer Bericht

**8.1.1** Vor der Ausführung der tiefreichenden Bodenstabilisierung muss zumindest die folgende Verfahrensbeschreibung übergeben werden:

- a) Beschreibung, Ziel und Zweck der tiefreichenden Bodenstabilisierungsarbeiten;
- b) Beschreibung des Bodens nach EN ISO 14688-1:2002 und EN ISO 14688-2:2004;
- c) Geometrie der tiefreichenden Bodenstabilisierungssäule;
- d) Verfahren der tiefreichenden Bodenstabilisierung;
- e) Mischwerkzeug: Form/Maße/Anordnung der rotierenden Einheit(en), Lage(n) der Auslässe, Form und Länge der Mischwelle;
- f) Arbeitsvorgang (Bohren und Ziehen, Mischen und Ausführungsreihenfolge (siehe Tabelle 1));
- g) Einbaugenauigkeit;
- h) Parameter der tiefreichenden Bodenstabilisierung: Bindemittelart und -zusammensetzung, Bindemittelgehalt/Bindemittelfaktor, Volumenverhältnis, Wasser-/Bindemittelverhältnis, Zusatzmittel, Füller (siehe Tabelle 1);
- i) Vorkehrungen gegen Hebungen und Setzungen;
- j) Baustelleneinrichtung und -arbeitsflächen;
- k) Geräte und Ausrüstung;
- l) Überschussbehandlung;
- m) Maßnahmen zur Qualitätskontrolle nach den Anforderungen des Vertrags;
- n) Maßnahmen bei möglichen Unterbrechungen der Ausführung der tiefreichenden Bodenstabilisierung;
- o) mögliche Anpassungen der Parameter der tiefreichenden Bodenstabilisierung während der Arbeiten;
- p) Versuchsverfahren für Nachweise;
- q) Arbeitsunterlagen (Zeichnungen, Pläne, Berichte);
- r) Bewertung von Sicherheits- und Umweltrisiken.

### 8.2 Vorbereitung der Baustelle

**8.2.1** Die Vorbereitung muss in Übereinstimmung mit den Vorgaben der Bemessung und den spezifischen Umweltbedingungen der Baustelle erfolgen. Darin muss der geeignete Zugang für Einrichtungen und Maschinen enthalten sein, der Aushub, die Reinigung und das Nivellieren der Arbeitsebene, wobei eine ausreichende Tragfähigkeit für die Ausrüstung gegeben sein muss, sowie die Abnahme, Qualitätskontrolle und Lagerung von Baustoffen.

**8.2.2** Alle Baustoffe und Bauprodukte, die für die tiefreichende Bodenstabilisierung auf die Baustelle geliefert werden, müssen hinsichtlich den Bemessungsvorgaben identifiziert und geprüft werden (siehe 6.1.2).

**8.2.3** Bindemittel müssen vor dem Zutritt von Feuchtigkeit oder Luft geschützt werden, durch den nachteilige Auswirkungen auf deren Verwendung und/oder Eigenschaften verursacht werden könnten.

### **8.3 Feldversuche**

**8.3.1** In Fällen, wo vergleichbare vorherige Erfahrungen nicht verfügbar sind, müssen repräsentative Feldversuche durchgeführt werden, um die Erreichbarkeit der Bemessungsanforderungen zu bestätigen und die wesentlichen Kontrollparameter festzulegen, wobei gleiche Ausrüstung, Materialien, Techniken und Abläufe wie in den Festlegungen für die Ausführung der Hauptarbeiten verwendet werden müssen.

**8.3.2** Folgende Werte müssen in der Ausführungskontrolle enthalten sein:

- a) Abbohr- und Ziehgeschwindigkeit des Mischwerkzeugs;
- b) Umdrehungsgeschwindigkeit der rotierenden Einheit(en) des Mischwerkzeugs;
- c) Luftdruck (im Fall der Trockenmischung);
- d) Pumprate von Bindemittel/Suspension.

**ANMERKUNG** Unter gewissen Umständen sollten andere Parameter überwacht werden, sofern sie einen direkten Einfluss auf die Qualität und das Verhalten der Arbeiten haben, z. B. die Überschneidungsbreite im Fall der Anwendung als Abdichtungswand oder das Drehmoment, wenn Säulen in einer steifen Schicht gegründet werden.

### **8.4 Ausführung**

#### **8.4.1 Allgemeines**

**8.4.1.1** Vor dem Einbau der Säulen muss die Lage jeder einzelnen Säule vermessen und markiert werden.

**8.4.1.2** Die Säulen müssen innerhalb der durch die Bemessung festgelegten geometrischen Toleranzen hergestellt werden.

**8.4.1.3** Die Messung von Vertikalität und Neigung kann mittels Inklinometer durchgeführt werden.

#### **8.5 Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung**

**8.5.1** Es muss ein Qualitätsplan vorgelegt werden, der die Methoden und die Häufigkeit der während der Ausführung und des Überprüfungsprozesses durchzuführenden Kontrollen festlegt und den Umgang mit allen Abweichungen definiert (siehe EN ISO 9000). Der Qualitätsplan muss auch alle Dokumente (Zeichnungen, Verfahrensbeschreibungen, Pläne usw.) festlegen, die für die Ausführung der Arbeiten erforderlich sind.

**8.5.2** Die in 9.3 erläuterten Versuche an behandelten Böden müssen durchgeführt werden und die Versuchsverfahren, wie in Anhang B vorgestellt, müssen in Übereinstimmung mit den Festlegungen der Bemessung verwendet werden (siehe 7.4 und 9.3).

**8.5.3** Wenn die während der Ausführung angetroffenen Verhältnisse nicht mit den Annahmen der Bemessung übereinstimmen, muss dies den für das Projekt Verantwortlichen unverzüglich angezeigt werden.

#### **8.6 Tieferreichende Bodenstabilisierung**

##### **8.6.1 Allgemeines**

**8.6.1.1** Die Ausführung der tieferreichenden Bodenstabilisierung kann entweder im Nass- oder im Trockenmischverfahren erfolgen. Diese beiden Verfahren werden ausführlich in Anhang A beschrieben.

ANMERKUNG 1 Die tiefreichende Bodenstabilisierung erfolgt durch mechanische Zerlegung des Bodens bei vorwiegend vertikaler Bewegung von rotierenden Mischeinheit(en) und das Einbringen von Bindemittel, welches während des Abbohrvorganges und/oder des Rückziehens mit dem Boden homogen vermischt wird. Die Ausführung der tiefreichenden Bodenstabilisierung kann entweder im Nass- oder im Trockenmischverfahren erfolgen. Diese beiden Verfahren werden ausführlich in Anhang A beschrieben.

ANMERKUNG 2 Im Trockenmischverfahren ist das Transportmedium des Bindemittels üblicherweise Druckluft.

ANMERKUNG 3 Im Nassmischverfahren ist das Transportmedium des Bindemittels üblicherweise Wasser.

**8.6.1.2** Die Ausrüstung und das Mischwerkzeug sind an jedem Säulenansatzpunkt in Übereinstimmung mit den in der Bemessung festgelegten Ausführungstoleranzen korrekt zu positionieren.

**8.6.1.3** Die Menge des Bindemittels muss im Verlauf der Säule während der Herstellung gemessen werden.

**8.6.1.4** Die zur Aufzeichnung der Menge von Bindemittel oder Feststoffen zur Suspensionsherstellung verwendete Ausrüstung muss kalibriert werden.

**8.6.1.5** Jeglicher Überschuss muss gesammelt und unter Beachtung der gesetzlichen oder rechtlichen Vorschriften entsorgt werden.

## **8.6.2 Trockenmischverfahren**

**8.6.2.1** Die Ausführung des Trockenmischverfahrens muss den Festlegungen der Planung entsprechen.

ANMERKUNG 1 Die Herstellung findet üblicherweise wie folgt statt:

- Das Mischwerkzeug wird korrekt positioniert;
- die Mischwelle dringt auf die vorgesehene Behandlungstiefe ein, wobei gleichzeitig das Zerlegen des Bodens durch das Mischwerkzeug erfolgt;
- nach dem Erreichen der vorgesehenen Tiefe wird die Mischwelle zurückgezogen und gleichzeitig das Bindemittel in körniger oder pulverförmiger Form in den Boden eingebracht; das Mischwerkzeug rotiert in horizontaler Ebene und vermischt Boden und Bindemittel.

ANMERKUNG 2 Das Bindemittel kann auch während des Abbohrens injiziert und mit dem Boden vermischt werden.

**8.6.2.2** Die Ausrüstung und das Mischwerkzeug müssen dem Ausführungsverfahren, der Tiefe des zu behandelnden Bodens und den in der Planung festgelegten Ausführungstoleranzen angepasst sein.

ANMERKUNG Wenn das Bindemittel während des Abbohrens injiziert und mit dem Boden vermischt wird, muss die Einspritzdüse am oder unter dem Mischwerkzeug positioniert werden.

**8.6.2.3** Die Umdrehungsgeschwindigkeit der rotierenden Einheit(en) und die Bohr- und Rückziehrate des Mischwerkzeugs müssen so eingestellt werden, dass ein ausreichend homogen behandelter Boden entsteht.

ANMERKUNG 1 Gebräuchliche Abbohr- bzw. Ziehgeschwindigkeiten der Mischwelle sind üblicherweise 10 mm/U bis 50 mm/U und die Flügelumdrehungszahl beträgt üblicherweise 200 bis 500.

ANMERKUNG 2 Die benötigten Mischarbeiten zur Herstellung einer Säule im Trockenmischverfahren hängen von der Art und Menge des Bindemittels und der Bodenart ab. Zement als Bindemittel erfordert eine höhere Mischenergie als die ausschließliche Verwendung von Kalk.

**8.6.2.4** Bei der Trockenmischung muss der Luftdruck während des Mischvorgangs so niedrig wie möglich gehalten werden, um die Problematik von Luftaustritten und Bodenbewegungen zu vermeiden.

ANMERKUNG Wenn der Luftdruck zu niedrig ist, könnte das Bindemittel nicht über den vollen Querschnitt der Säule verteilt werden.

## EN 14679:2005 (D)

**8.6.2.5** Die Menge des Bindemittels und der Luftdruck sind während der Säulenherstellung zu überwachen.

**8.6.2.6** Die Mischenergie sollte überwacht werden, um zu erreichen, dass ein ausreichend homogener behandelter Boden entsteht.

### 8.6.3 Nassmischverfahren

**8.6.3.1** Die Ausführung des Nassmischverfahrens muss den Festlegungen der Bemessung entsprechen.

ANMERKUNG Der Aufbau wird üblicherweise wie folgt durchgeführt:

- Das Mischwerkzeug wird korrekt positioniert;
- die Mischwelle dringt auf die vorgesehene Behandlungstiefe ein, wobei gleichzeitig das Zerlegen des Bodens durch das Mischwerkzeug und/oder die Injektion der Suspension, üblicherweise Zementschlämme sowie mögliche Füller und Zusatzmittel, erfolgt;
- nach dem Erreichen der vorgesehenen Tiefe wird die Mischwelle zurückgezogen und in einigen Fällen wird die Suspension gleichzeitig in den Boden injiziert und mit diesem vermischt.

**8.6.3.2** Die Ausrüstung und das Mischwerkzeug müssen dem Ausführungsverfahren, der Tiefe des zu behandelnden Bodens und den in der Bemessung festgelegten Ausführungstoleranzen entsprechen.

ANMERKUNG 1 Bei Geräten mit einer Düse am unteren Ende des Mischwerkzeugs darf die Suspension während des Ziehvorgangs nicht hinzugefügt werden.

ANMERKUNG 2 Während eine fortlaufende Schnecke für hauptsächlich nichtbindige Böden ausreichend sein kann, erfordern bindige Böden aufwändigere Mischwerkzeuge. Die Antriebe zum Drehen der Mischwelle müssen über eine ausreichende Leistung verfügen, um die Bodenmatrix zu zerstören, so dass eine gründliche Vermischung mit der Suspension möglich wird.

**8.6.3.3** Die Umdrehungsgeschwindigkeit der rotierenden Einheit(en) und die Abbohr- und Ziehrate des Mischwerkzeugs müssen so eingestellt werden, dass ein ausreichend homogener behandelter Boden entsteht.

ANMERKUNG Gebräuchliche Umdrehungsgeschwindigkeiten der Mischwelle sind üblicherweise 25 U/min bis 50 U/min und die Flügelumdrehungszahl beträgt üblicherweise mehr als 350.

**8.6.3.4** Während des Mischens muss die Suspension durch Pumpen mit kontinuierlichem Durchfluss in den zu behandelnden Boden eingebracht werden.

**8.6.3.5** Das Nassmischverfahren kann unterbrochen werden, wenn die Suspension noch nicht auszuhärten begonnen hat und das Mischwerkzeug wieder auf einer Höhe von mindestens 0,5 m innerhalb des bereits behandelten Bodenbereichs gestartet wird.

**8.6.3.6** Es kann ein wiederholter Mischvorgang durchgeführt werden, um der behandelten Säule zusätzliche Suspension bis zu einer bestimmten Dosierung hinzuzufügen, um einen Teil der Schichtung durch die Bearbeitung besser zu verflüssigen oder um die rotierenden Einheiten während eines Stillstands oder einer Warteperiode in Bewegung zu halten.

**8.6.3.7** Die Dichte der Suspension muss zumindest zweimal je Arbeitsschicht bei jeder Mischereinheit mit einer geeigneten Vorrichtung überprüft werden. Im Falle manueller Mischgutzugabe muss die Häufigkeit der Kontrollen erhöht werden.

## 8.7 Einbau der Bewehrung

**8.7.1** Eine Bewehrung (Stahlstäbe, Bewehrungskörbe oder Stahlträger) kann in die vor Ort frisch gemischten Säulen oder Elemente eingebaut werden.

ANMERKUNG Für den Einbau kann die Verwendung eines Rüttlers erforderlich sein.

**8.7.2** Jede Bewehrung ist nach den Planungsfestlegungen einzubauen (siehe 7.5.1 h)).

## 9 Bauüberwachung, Prüfungen und Kontrollen

### 9.1 Allgemeines

**9.1.1** Das Ausmaß von Prüfungen und Kontrollen sollte in den Festlegungen der Bemessung angegeben werden.

**9.1.2** Die spezifischen Abläufe zur Verifizierung, Kontrolle und Abnahme müssen vor Beginn der Arbeiten festgelegt werden.

### 9.2 Bauüberwachung

**9.2.1** Um zu überprüfen, dass die Ausführung mit der Bemessung und anderen Vertragsdokumenten übereinstimmt, muss qualifiziertes Personal mit Erfahrung bei der Anwendung der Technik mit der Ausführung betraut werden.

**9.2.2** Für den Fall, dass unvorhergesehene Bedingungen angetroffen werden oder neue Informationen über die Bodenverhältnisse auftauchen, müssen diese unverzüglich entsprechend den festgelegten Informationsverfahren (siehe 7.5.1 j)) angezeigt werden.

### 9.3 Prüfungen

**9.3.1** Die Übereinstimmung mit den Bemessungsannahmen muss hinsichtlich der Festigkeitseigenschaften, Verformungseigenschaften und Homogenität der Säulen und, wo relevant, auch hinsichtlich deren Länge und Durchmesser, Durchlässigkeit, Neigung und Überschneidung verifiziert werden.

**9.3.2** Das Ausmaß und die Verfahren der Ausführungskontrollen müssen vor Beginn der tiefreichenden Bodenstabilisierungsarbeiten für jeden einzelnen Fall definiert werden (Art der Anwendung und Beschreibung der Kontrollen).

ANMERKUNG Das Ausmaß der Kontrollen und die Kontrollverfahren hängen vom Anwendungsfall und den funktionalen Anforderungen ab. Eine Anleitung über geeignete Verfahrenen zur Ausführungskontrolle von behandelten Boden (z. B. einaxiale Druckversuche, Triaxialversuche, Ödometerversuche, Abbohrversuche in Säulen, Ziehversuche in Säulen, CPTU-Versuche, Pressiometerversuche, seismische Versuche) wird im informativen Anhang B angegeben.

**9.3.3** Prüfungen der Qualitätskontrolle sollten gleichmäßig verteilt sein, sowohl in zeitlicher Hinsicht als auch bezüglich der verwendeten Mischwerkzeuge.

**9.3.4** Die Kontrollversuche sollten eine ausreichende Anzahl von Säulen betreffen, um die Verteilung und die Mittelwerte für die Säuleneigenschaften für jede von den tiefreichenden Bodenstabilisierungsarbeiten betroffene, signifikante Bodenschicht zu erhalten.

**9.3.5** Die Anzahl der zu testenden Säulen sollte für jeden Einzelfall unter Berücksichtigung des Zwecks und des Ausmaßes der Behandlung und des Anwendungsfalls entschieden werden.

**9.3.6** Wo erforderlich (z. B. im Zusammenhang mit Immobilisierungen, Rückhalteaufgaben und Anwendungen für Stützwände), sollten aussagekräftige chemische Versuche durchgeführt werden (z. B. Feststellung des Gehalts von chemisch aktiven Substanzen, pH-Wert, Karbonatgehalt, Chloridgehalt, Sulfatgehalt und Sulfidgehalt).

**9.3.7** Wo Säulenüberschneidung ein wesentlicher Bestandteil der Planung ist, muss die Stärke der Überschneidungszone zwischen benachbarten Säulen überprüft werden.

ANMERKUNG Die Stärke der Überschneidungszone kann durch die Verwendung von Inklinometern während des Abbohrvorgangs und des Rückziehens und durch Säulendurchbohrungen sowie Sichtkontrolle erfolgen.

**9.3.8** Säulen, die als Stützwandelemente freigelegt werden, müssen während des Aushubs visuell auf Inhomogenitäten überprüft werden.

## 9.4 Kontrollen

### 9.4.1 Ausführungsphase

**9.4.1.1** Die folgenden Herstellungsparameter und Informationen müssen während der Herstellung oder zumindest in Tiefenabständen von 0,5 m kontinuierlich aufgezeichnet werden (siehe Tabelle 1).

**Tabelle 1 — Herstellungsparameter**

<b>Trockenmischverfahren</b>	<b>Nassmischverfahren</b>
Druck im Luftbehälter	Suspensionsdruck; Luftdruck (wenn vorhanden)
Bohr- und Ziehrate	Bohr- und Ziehrate
Umdrehungsgeschwindigkeit (Umdrehungen/ Minute während des Abbohrens und Ziehens)	Umdrehungsgeschwindigkeit (Umdrehungen/Minute während des Abbohrens und Ziehens)
Menge von Bindemittel je Tiefenmeter während des Abbohrens und Ziehens	Menge von Suspension je Tiefenmeter während des Abbohrens und Ziehens

**ANMERKUNG** Bei einigen Anwendungsfällen, insbesondere wenn eingeschlossener Wandverlauf erforderlich ist, ist die Aufzeichnung der Positionierung und Vertikalität des Mischwerkzeugs erforderlich.

**9.4.1.2** Einige begrenzte Informationen über die Bodenart und Grundwasserverhältnisse können durch die Aufzeichnung der Leistungsparameter des Gerätes (wie des Energiebedarfs und des Bohrwiderstands des Bohrwerkzeugs) und des Rücklaufs erhalten werden.

**9.4.1.3** Die Bauausführung muss kontrolliert werden und die relevanten Arbeitsparameter sowie Informationen über die Bodenverhältnisse und Arbeitstoleranzen müssen während der Ausführung aufgezeichnet werden.

**9.4.1.4** Die Ausführung sollte automatisch aufgezeichnet werden, vornehmlich mit Hilfe von Computersystemen.

**ANMERKUNG** In einem Computersystem werden der Verpressdruck, die Verpressrate, die Art des Mischwerkzeugs, der Bindemittelfaktor, der Bindemittelgehalt und des Wasser/Bindemittel-Verhältnis aufgezeichnet. Für jede hergestellte Säule wird ein Ausdruck erzeugt. Hierdurch kann zu einem frühen Zeitpunkt entschieden werden, ob eine Adaptierung der Ausführungstechnik erforderlich ist und ob zusätzliche Säulen hergestellt werden müssen.

## 9.5 Verhalten des behandelten Bodens

**9.5.1** Vertikale und seitliche Bewegungen des Bodens sollten durch geeignete Verfahren aufgezeichnet werden. Für gewisse Anwendungen sollten andere Parameter wie z. B. Porenwasserdruck aufgezeichnet werden.

**9.5.2** Abweichungen von festgelegten Bemessungsgrenzen müssen angezeigt werden.

## 9.6 Weitere Aspekte

Messinstrumente müssen früh genug installiert werden, um verlässliche Referenzwerte vor dem Beginn der Arbeiten zu erhalten.

## 10 Aufzeichnungen

### 10.1 Aufzeichnung während der Arbeiten

**10.1.1** Aufzeichnungen müssen die relevanten Aspekte der Ausführung betreffen: Ausführung der Säulen, Versuche und Beobachtungen wie in Abschnitt 9 beschrieben, und diese müssen auf der Baustelle verfügbar sein.

**10.1.2** Folgende Ausführungsparameter müssen während der Ausführung aufgezeichnet werden (siehe Tabelle 2).

**Tabelle 2 — Ausführungsparameter**

<b>Trockenmischverfahren</b>	<b>Nassmischverfahren</b>
Datum und Dauer der Ausführung	Datum und Dauer der Ausführung
Säulenbezeichnung	Säulenbezeichnung
Form der Mischwelle und des Werkzeugs	Form der Mischwelle und des Werkzeugs
Abbohr- und Ziehrate (mm/Umdrehung) oder Geschwindigkeit (m/min)	Abbohr- und Ziehrate (mm/Umdrehung) oder Geschwindigkeit (m/min)
Umdrehungsgeschwindigkeit (Umdrehungen/Minute während des Abbohrens und Ziehens)	Umdrehungsgeschwindigkeit (Umdrehungen/Minute während des Abbohrens und Ziehens)
Bindemittelart und -zusammensetzung	Bindemittelart und -zusammensetzung
	Wasser/Bindemittel-Verhältnis
Ausführungstoleranzen (Vertikalität, Durchmesser, Ansatzpunkt)	Ausführungstoleranzen (Vertikalität, Durchmesser, Ansatzpunkt)
Reihenfolge und Zeitablauf	Reihenfolge und Zeitablauf
Ober- und Unterkante	Ober- und Unterkante

### 10.2 Aufzeichnung nach Abschluss der Arbeiten

**10.2.1** Die Aufzeichnungen der tatsächlich ausgeführten Arbeiten müssen unter anderem enthalten:

- a) Aufzeichnungen nach 10.1;
- b) Informationen zur näheren Beschreibung der tatsächlich ausgeführten Säulen, einschließlich Testergebnissen und allen Abweichungen von den Darstellungen und Beschreibungen der Planung;
- c) Einzelheiten der verwendeten Baustoffe und Bauprodukte;
- d) Einzelheiten der relevanten geotechnischen Bodenverhältnisse.

## 11 Besondere Anforderungen

### 11.1 Allgemeines

**11.1.1** Nur solche Aspekte der Baustellensicherheit und des Umweltschutzes, die für die tiefreichende Bodenstabilisierung spezifisch sind, werden in diesem Abschnitt behandelt.

**11.1.2** Alle relevanten Europäischen und nationalen Normen, Vorschriften und rechtlichen Anforderungen bezüglich Sicherheit und Umwelt müssen während der Ausführung der Arbeiten befolgt werden.

## **11.2 Sicherheit**

**11.2.1** Besondere Aufmerksamkeit muss allen Vorgängen gewidmet werden, bei denen die Arbeit von Menschen in der Nähe von schweren Geräten und Werkzeugen erforderlich ist. Im Besonderen kann die Bewegung der Mischrüstung Gefahren hervorrufen und daher müssen spezifische Überlegungen bezüglich der Sicherheit des in der Nähe von rotierenden Einheiten arbeitenden Personals angestellt werden. Die Verarbeitung von Baustoffen und Bauprodukten muss unter Beachtung der Sicherheitsanweisungen des Herstellers erfolgen.

## **11.3 Umweltschutz**

Die Bauausführung sollte umweltbedingte Einschränkungen wie Lärm, Vibrationen, Luft- und Wasserverschmutzung und Einflüsse auf angrenzende Bauwerke erkennen und berücksichtigen

## **11.4 Einfluss auf angrenzende Bauwerke**

**11.4.1** Wo sich empfindliche Bauwerke oder instabile Böschungen in der Nachbarschaft der Baustelle oder im Einflussbereich der Arbeitsdurchführung befinden, sollte deren Zustand vor und während der Arbeitsdurchführung sorgfältig überwacht und dokumentiert werden.

## **Anhang A** (informativ)

### **Praktische Aspekte der tiefreichenden Bodenstabilisierung**

#### **A.1 Einleitung**

Das Ziel der tiefreichenden Bodenstabilisierung ist die Verbesserung der Bodeneigenschaften, z. B. die Erhöhung der Scherfestigkeit und/oder die Verringerung der Zusammendrückbarkeit, indem der Boden mit chemischen Zusatzmitteln vermischt wird, die mit diesem reagieren. Die Verbesserung wird durch Ionenaustausch an der Oberfläche von Tonmineralen, durch Bindung von Bodenbestandteilen und/oder durch Ausfüllen von Hohlräumen mit den Produkten chemischer Reaktionen ermöglicht. Die tiefreichende Bodenstabilisierung wird entsprechend dem verwendeten Bindemittel (Zement, Kalk/Zement und mögliche Zusatzmittel wie Gips, Flugasche usw.) und dem Mischverfahren (nass/trocken, rotierend/mittels Düsenstrahl, auf Schnecken- oder auf Flügelbasis) klassifiziert.

Die Entwicklung der tiefreichenden Bodenstabilisierung begann in Schweden und in Japan in den späten 60er Jahren des 20. Jahrhunderts. Das Trockenmischverfahren unter Verwendung von Kalkgranulat (ungelöschter Kalk) als Bindemittel wird seit Mitte der 70er Jahre in Japan angewendet. Ungefähr zur selben Zeit wurde das Trockenmischverfahren in Schweden als Kalkeinmischung (Kalk in Pulverform) zur Verbesserung der Setzungseigenschaften von weichem plastischen Ton entwickelt. Das Nassmischverfahren unter Verwendung von Zementsuspension als Bindemittel wird in Japan ebenfalls seit Mitte der 70er Jahre angewendet. Seit dieser Zeit hat sich die tiefreichende Bodenstabilisierung in andere Teile der Welt ausgebreitet. In jüngerer Vergangenheit wurde die Kombination von Zement und Kalk mit Gips, Flugasche und Schlacke eingeführt.

Seit der Einführung wurden der Anwendungsbereich erweitert, die Ausrüstung verbessert und die festigkeitsgebenden Zusatzmittel verändert. Als Ergebnis umfassender Forschung und zunehmender praktischer Erfahrungen wurde die tiefreichende Bodenstabilisierung in zahlreichen Ländern anerkannt. Zunehmendes Umweltbewusstsein hat zur Anwendung der tiefreichenden Bodenstabilisierung zur Sanierung und Sicherung von kontaminierten Bereichen geführt.

Unlängst wurden Hybridtechniken entwickelt, bei denen die tiefreichende Bodenstabilisierung mit anderen Verfahren zur Bodenverbesserung (wie beispielsweise den Düsenstrahlverfahren (jet grouting)) oder mit anderen Geräten (Oberflächenmischung) kombiniert wird. Die Entwicklung der Technologie in den letzten 25 Jahren wurde unter anderem von Terashi (2001) zusammengefasst. Die allgemeine Klassifizierung der Ausrüstungen ist in Bild A.1 dargestellt.

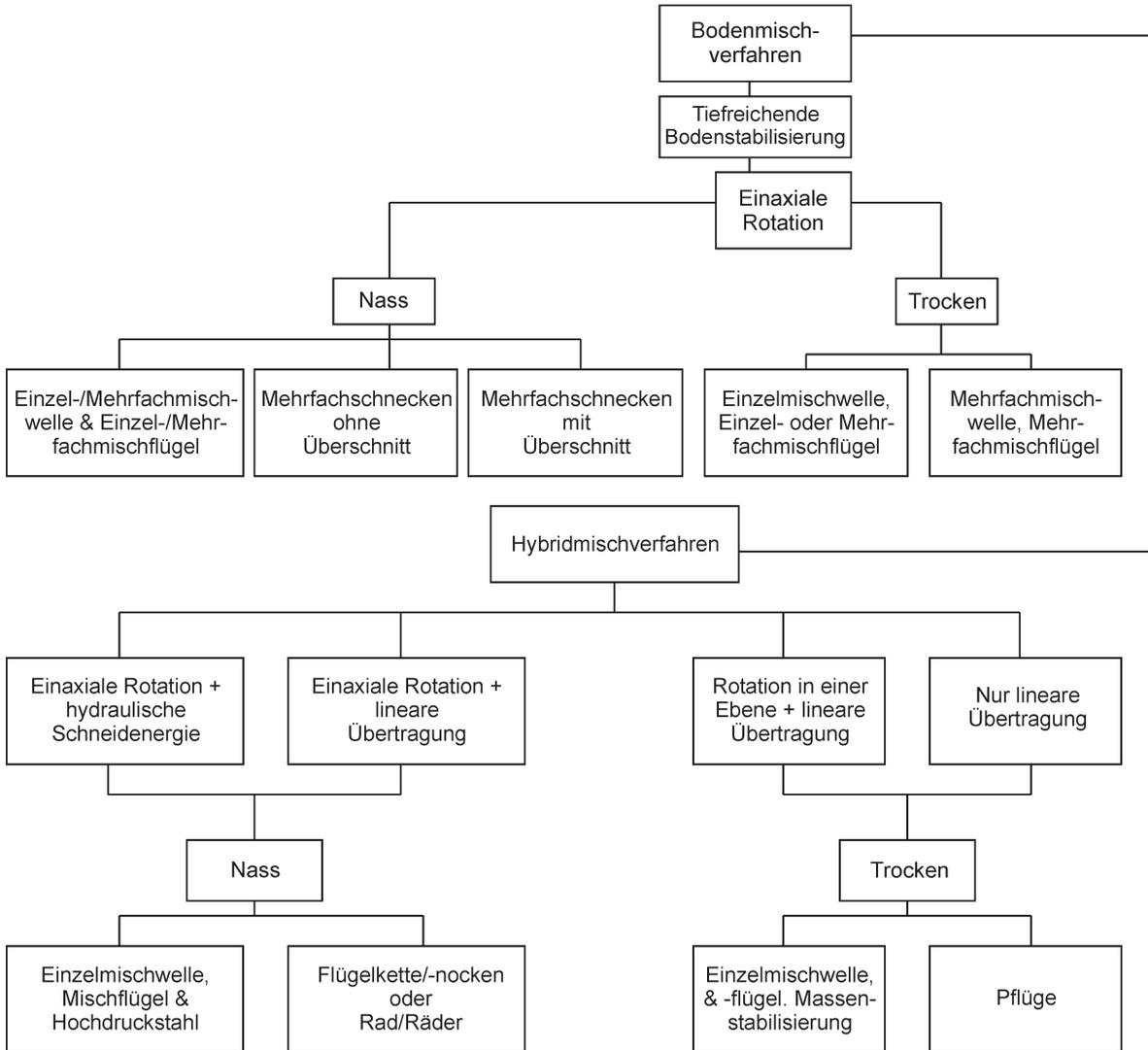
#### **A.2 Anwendungsbereich**

Es existieren zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten für die tiefreichende Bodenstabilisierung für temporäre und permanente Maßnahmen sowohl an Land als auch unter Wasser, siehe Bild A.2. Die Hauptanwendungen sind die Verringerung von Setzungen, die Erhöhung der Stabilität und Sicherungsmaßnahmen.

#### **A.3 Ausführung**

##### **A.3.1 Allgemeines**

Die Ausführung besteht üblicherweise aus Geräteaufstellung, Abbohren und Rückziehen. Während des Abbohrens lösen und zerlegen die Mischwerkzeuge den Boden bis zur vorgesehenen Behandlungstiefe. Während des Rückziehens wird das Bindemittel mit einer konstanten Durchflussrate in den Boden eingebracht, da die Ziehgeschwindigkeit konstant gehalten wird. Die Mischflügel rotieren in horizontaler Ebene und vermischen Boden und Bindemittel. Es gibt jedoch auch Gerätevariationen, bei denen das Bindemittel entweder nur beim Abbohren oder sowohl beim Abbohren als auch beim Rückziehen eingebracht wird.

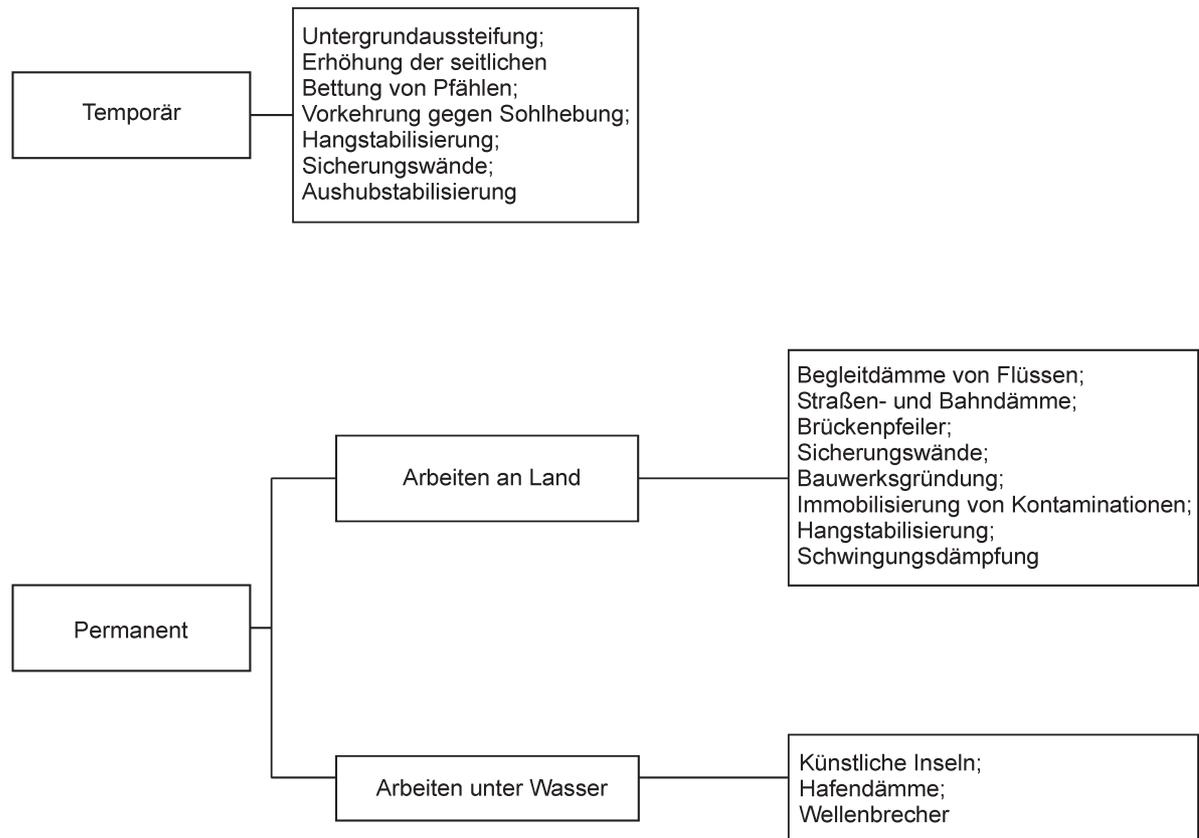


**Bild A.1 — Allgemeine Klassifizierung der Ausrüstungen, die bei den Verfahren zur tiefreichenden Bodenstabilisierung gemäß dieser Norm sowie bei Hybridtechniken angewendet werden, die nicht Gegenstand dieser Norm sind**

Wenn die Bodenbewegungen während der Ausführung auf ein Mindestmaß zu reduzieren sind, können spezielle Mischwerkzeuge angewendet werden.

Die tiefreichende Bodenstabilisierung kann auf zwei verschiedene Arten ausgeführt werden: mit dem Trockenmischverfahren unter Bindemittelbeigabe mittels Druckluft und mit dem Nassmischverfahren unter Beigabe von Bindemittel in Suspensionsform.

Beim Trockenmischverfahren ist das Bindemittel üblicherweise eine Mischung aus Zement und Kalk (ungelöscht) oder eine Kombination aus Zement, Kalk, Gips, Hochofenschlacke oder pulverisierter Flugasche (PFA) in körniger oder Pulverform. Um das Bindemittel in den Boden einzubringen bzw. einzubauen, wird Druckluft verwendet (der Feuchtigkeitsgehalt des Bodens muss  $\geq 20\%$  betragen).



**Bild A.2 — Anwendungen der tiefreichenden Bodenstabilisierung zu verschiedenen Zwecken**

Beim Nassmischverfahren ist Zement das gebräuchlichste Bindemittel.

Das Trockenmischverfahren wird vorwiegend zur Verbesserung der Eigenschaften von bindigen Böden angewendet, während das Nassmischverfahren auch zur Verbesserung der Eigenschaften von nichtbindigen Böden zur Anwendung kommt. Bei bestimmten Anwendungen, z. B. zur Vorbeugung gegen Bodenverflüssigung, wurde das Trockenmischverfahren auch in lockeren nichtbindigen Böden eingesetzt.

Bei Kontaminationen oder Gefahrenbereichen im Untergrund, die das Ausführungsverfahren, die Arbeitssicherheit oder die Deponierung von Aushubmaterial einer Baustelle beeinträchtigen können, kann es sich um alte Müllablagerungen, Industrieabfälle, chemische Abfallprodukte usw. handeln. Hindernisse, wie z. B. Blöcke und Wurzelgeflechte, können die Wirksamkeit der tiefreichenden Bodenstabilisierung beeinträchtigen. Vor Beginn der Ausführung muss die angestrebte Säulenqualität festgestellt werden. Der Prozess der Ausführung von Projekten der tiefreichenden Bodenstabilisierung folgt den in Bild A.3 gezeigten Grundsätzen.

## A.3.2 Trockenmischverfahren

### A.3.2.1 Allgemeines

Das Trockenmischverfahren wird üblicherweise in Übereinstimmung mit den in Bild A.4 zusammengefassten allgemeinen Grundsätzen ausgeführt.

Wie im Flussdiagramm gezeigt, wird das Bindemittel in trockener Form mit Hilfe von Druckluft in den Boden eingebracht. Derzeit bestehen zwei Haupttechniken für das Trockenmischverfahren: die nordische und die japanische Technik.

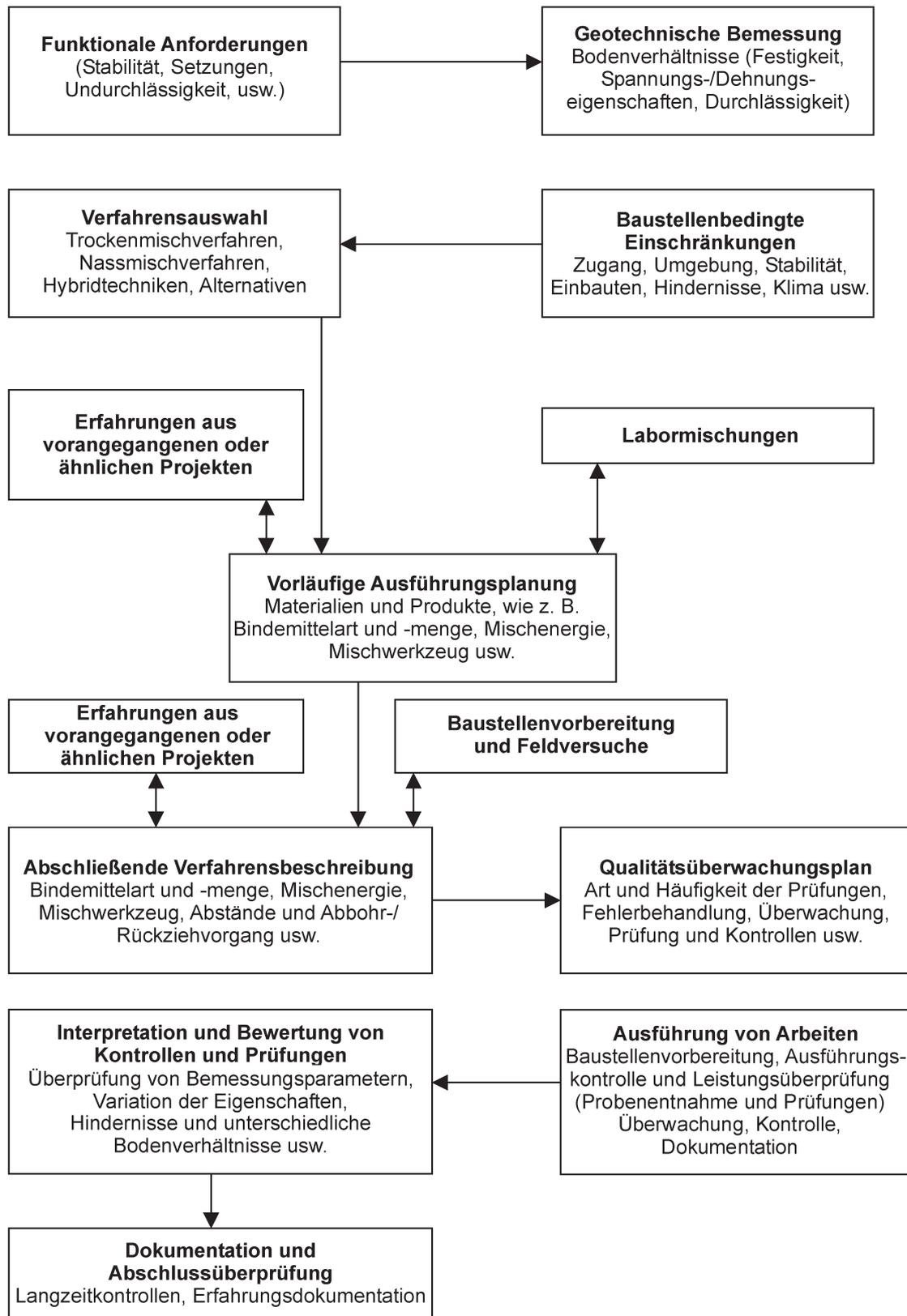
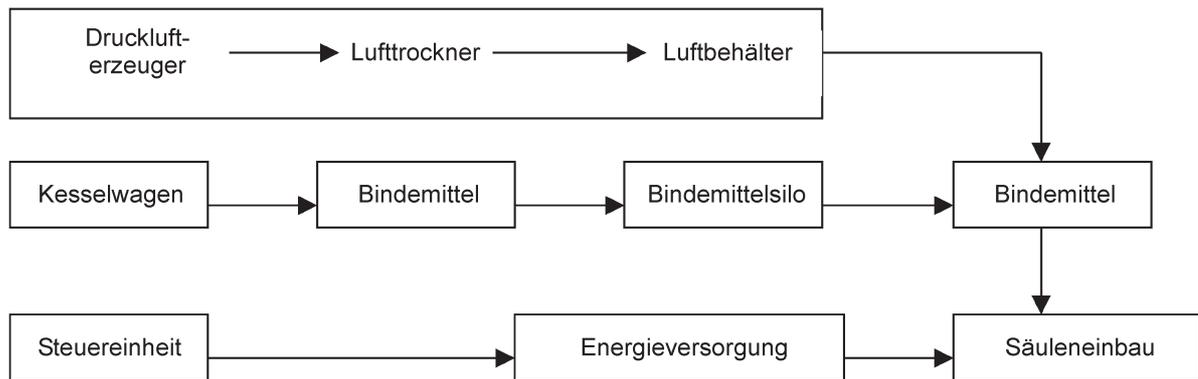
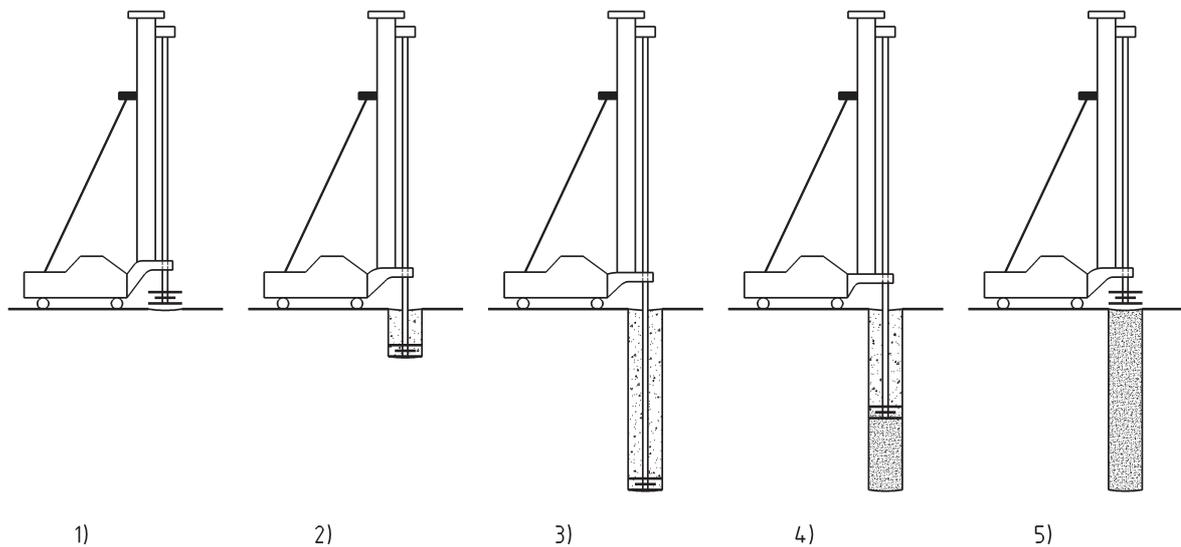


Bild A.3 — Grundsätze der Ausführung der tiefreichenden Bodenstabilisierung



**Bild A.4 — Flussdiagramm für die Ausführung des Trockenmischverfahrens**



**Bild A.5 — Reihenfolge des Einbaus**

Der Säuleneinbau erfolgt entsprechend dem folgendem Verfahren, von links nach rechts:

- 1) das Mischwerkzeug wird korrekt positioniert;
- 2) die Mischwelle dringt auf die vorgesehene Behandlungstiefe ein, wobei gleichzeitig das Zerlegen des Bodens durch das Mischwerkzeug erfolgt;
- 3) nach dem Erreichen der vorgesehene Tiefe wird die Mischwelle zurückgezogen und gleichzeitig das Bindemittel in körniger oder pulverförmiger Form in den Boden eingebracht;
- 4) das Mischwerkzeug rotiert in horizontaler Ebene und vermischt Boden und Bindemittel;
- 5) die behandelte Säule ist fertig gestellt.

**A.3.2.2 Nordische Techniken**

Die in den nordischen Ländern angewendeten Ausrüstungen können Säulen bis zu einer Tiefe von 25 m und mit Durchmesser von üblicherweise 0,6 m bis 1,0 m einbauen. Die Säulen können bis etwa 70° von der Vertikalen geneigt werden. Die Geräte besitzen eine Mischwelle mit einem Bindemittelauslass im Bereich des Mischwerkzeugs. Die Mischenergie und die Bindemittelmenge werden überwacht und in einigen Fällen automatisch gesteuert, um einen gleichmäßig behandelten Boden zu erzielen.

Das Mischwerkzeug wird bis zur Endtiefe in den Boden gebohrt, und eine vorab festgelegte Bindemittelmenge wird über ein innen liegendes Rohr mit einer Öffnung im Bereich des Mischwerkzeugs eingebracht (während des Ziehvorgangs). Während des Ziehvorgangs werden der Boden und das Bindemittel durch ständiges Drehen des Mischwerkzeugs vermischt. Beide Phasen können erforderlichenfalls an derselben Stelle wiederholt werden.

Die Umdrehungsgeschwindigkeit und die Ziehgeschwindigkeit des Mischwerkzeugs werden so eingestellt, dass eine für die Projektanforderungen ausreichend homogene Mischung erreicht wird. Das Ausmaß der Mischarbeit für die Herstellung einer Trockenmischsäule hängt von der Bindemittelart und -menge und von der Art des Bodens ab. Wenn Zement anstelle von ausschließlich Kalk zur Verwendung kommt, ist eine höhere Mischenergie erforderlich. Es wurden spezielle Geräte entwickelt, um Druckluft und Staub unter Kontrolle zu halten.

**A.3.2.3 Japanische Techniken**

Es existieren zahlreiche Variationen von Geräten mit ein oder zwei Mischwellen. Jede Mischwelle dieser Geräte ist mit mehreren Mischflügeln mit einem Durchmesser von 0,8 m bis 1,3 m ausgestattet und kann Säulen bis zu einer Tiefe von 33 m einbauen. Das Bindemittel, üblicherweise Zementpulver, wird mittels Druckluft zum Mischgerät transportiert. Ein Balg über der Mischwelle hat die Funktion, eine Ausbreitung der aus dem Boden kommenden Luft zu verhindern. Das Mischwerkzeug ist aus mehreren Einheiten von Mischflügeln zusammengesetzt, um die Homogenität der behandelten Säule zu erreichen. Die Bindemittelauslässe sind über und unter den Mischflügeln an der Mischwelle angeordnet. Ein Stahlstab fixiert den Abstand zwischen zwei Mischwellen. Dieser Stahlstab und gelegentlich zusätzliche frei rotierende Mischflügel (ohne eigenen Antrieb oder gegenläufig rotierend) hat/haben darüber hinaus die Funktion, das Mitrotieren von an den angetriebenen Mischflügeln und der Mischwelle haftendem Boden zu verhindern. Der Luftdruck und die Bindemittelmenge werden automatisch gesteuert, um die Homogenität der behandelten Säule zu erreichen.

Das Bindemittel wird während der Abbohrphase oder sowohl während des Abbohrens als auch beim Rückziehen eingebracht.

**Tabelle A.1 — Vergleich der nordischen und der japanischen Trockenmischtechnik**

Ausrüstung	Details	Nordische Technik	Japanische Technik
Mischgerät	Anzahl der Mischwellen	1	1 bis 2
	Durchmesser des Mischwerkzeugs	0,4 m bis 1,0 m	0,8 m bis 1,3 m
	maximale Behandlungstiefe	25 m	33 m
	Lage der Bindemittelauslässe	oberes Paar der Flügel	am Wellenende und/oder an den Flügeln (einzeln oder mehrfach)
	Injektionsdruck	variabel von 400 kPa bis 800 kPa	maximal 300 kPa
Dosieranlage	Einbringleistung	50 kg/min bis 300 kg/min	50 kg/min bis 200 kg/min

Typische Ausführungsparameter der nordischen und der japanischen Technik sind in Tabelle A.2 zusammengefasst.

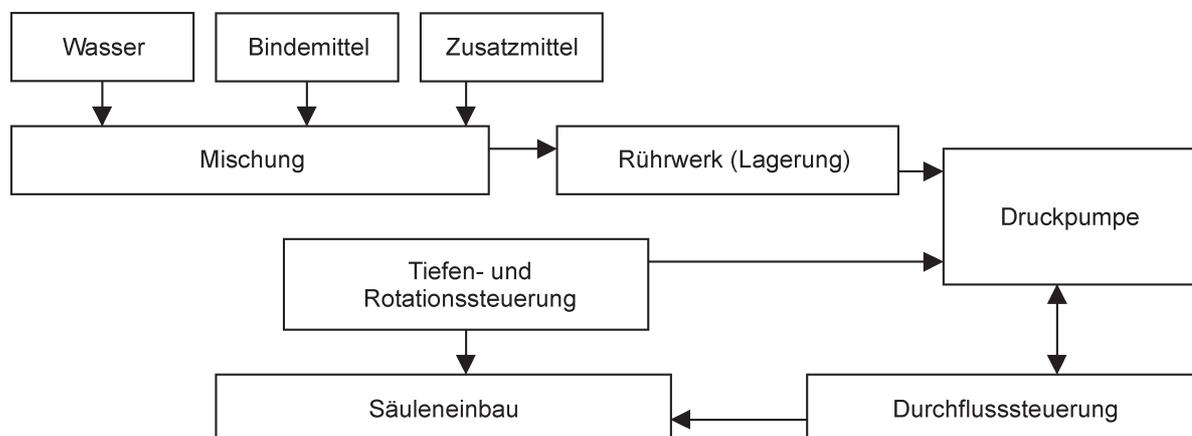
**Tabelle A.2 — Typische Ausführungsparameter der nordischen und der japanischen Trockenmischtechnik**

Mischgerät	Nordische Technik	Japanische Technik
Abbohrgeschwindigkeit der Mischwelle	2,0 m/min bis 6,0 m/min	1,0 m/min bis 2,0 m/min
Ziehgeschwindigkeit der Mischwelle	1,5 m/min bis 6,0 m/min	0,7 m/min bis 0,9 m/min
Umdrehungsgeschwindigkeit der Mischflügel	100 U/min bis 200 U/min	24 U/min bis 64 U/min
Umdrehungsindex der Mischflügel <sup>1)</sup>	150 je m bis 500 je m	≥ 274 je m
eingebraachte Bindemittelmenge	100 kg/m <sup>3</sup> bis 250 kg/m <sup>3</sup>	100 kg/m <sup>3</sup> bis 300 kg/m <sup>3</sup>
Ziehrate/Abbohrrate	10 mm/U bis 30 mm/U	10 mm/U bis 35 mm/U
Injektionsphase	meist während des Rückziehens	Abbohren und/oder Rückziehen

### A.3.3 Nassmischverfahren

#### A.3.3.1 Allgemeines

Das Nassmischverfahren wird in Übereinstimmung mit einigen allgemeinen Grundsätzen durchgeführt, die, wie in Bild A.6 gezeigt, zusammengefasst werden können.



**Bild A.6 — Flussdiagramm für die Ausführung des Nassmischverfahrens**

<sup>1)</sup> Unter dem Umdrehungsindex der Mischflügel wird die Gesamtanzahl der Mischflügel-Durchgänge verstanden, die während einer Wellenbewegung über 1 m stattfinden; er wird definiert durch die Gleichung  $T = \Sigma M \times (N_d/V_d + N_u/V_u)$ , wobei  $T$  = Umdrehungsindex der Mischflügel (n/m),  $\Sigma M$  = Gesamtanzahl der Mischflügel,  $N_d$  = Umdrehungsgeschwindigkeit der Flügel während des Abbohrens (U/min),  $V_d$  = Bohrgeschwindigkeit der Mischflügel (m/min),  $N_u$  = Umdrehungsgeschwindigkeit der Flügel während des Rückziehens und  $V_u$  = Geschwindigkeit der Mischflügel beim Rückziehen. Wenn das Bindemittel nur während des Ziehens eingebracht wird, wird  $N_d = 0$  gesetzt.

## EN 14679:2005 (D)

Beim Nassmischverfahren ist das Bindemittel üblicherweise Zementsuspension. Erforderlichenfalls können der Suspension Füller (Sand und Zusatzmittel) beigemischt werden. Die jeweilige Menge der beigemischten Suspension kann mit der Tiefe variieren. Bei Maschinen, bei denen der Auslass unter dem Mischwerkzeug liegt, darf die Suspension nicht während der Rückziehphase beigegeben werden.

Während Schnecken für hauptsächlich nichtbindige Böden ausreichend sein können, erfordern geringere Korndurchmesser und höhere Steifigkeiten aufwändigere Mischwerkzeuge, die mit Schneid- und Mischflügeln unterschiedlicher Form und Anordnung versehen sind. Die Antriebe zum Drehen der Mischwelle müssen über eine ausreichende Leistung verfügen, um die Bodenmatrix zu zerstören, so dass eine gründliche Mischung mit der Suspension möglich wird.

In Abhängigkeit von Boden- und Suspensionsart entsteht eine mörtelähnliche Mischung, die während des Hydratationsprozesses aushärtet. Die Festigkeit und die Durchlässigkeit hängen stark von der Zusammensetzung und den Eigenschaften des Bodens (Gehalt an Feinanteilen, organische Anteile, Art der Tonminerale, Kornform, Kornverteilung, Kornhärte) sowie von der Menge und der Art des Bindemittels und dem Mischverfahren ab.

Der Nassmischprozess kann unter der Voraussetzung unterbrochen werden, dass die Aushärtung der Suspension noch nicht eingesetzt hat und dass die Behandlung durch das Mischwerkzeug mindestens 0,5 m innerhalb des bereits behandelten Bodenbereichs erneut beginnt.

Pumpen für den Transport der Suspension zum Auslass müssen das erforderliche Leistungsvermögen (Fördermenge und Druck) aufweisen, um die projektgemäße Suspensionsmenge sicher zu fördern.

Das Nassmischverfahren ist in Mittel- und Südeuropa, Nordamerika und Japan gebräuchlich.

### A.3.3.2 Europäische Techniken

In Europa wird der Einbau von Nassmischsäulen, abhängig von den Bodenverhältnissen und der Anwendung, entweder mittels Bohrschnecken (fortlaufende oder unterbrochene Schnecken, einzeln oder mehrfach) oder mittels Mischflügeln durchgeführt.

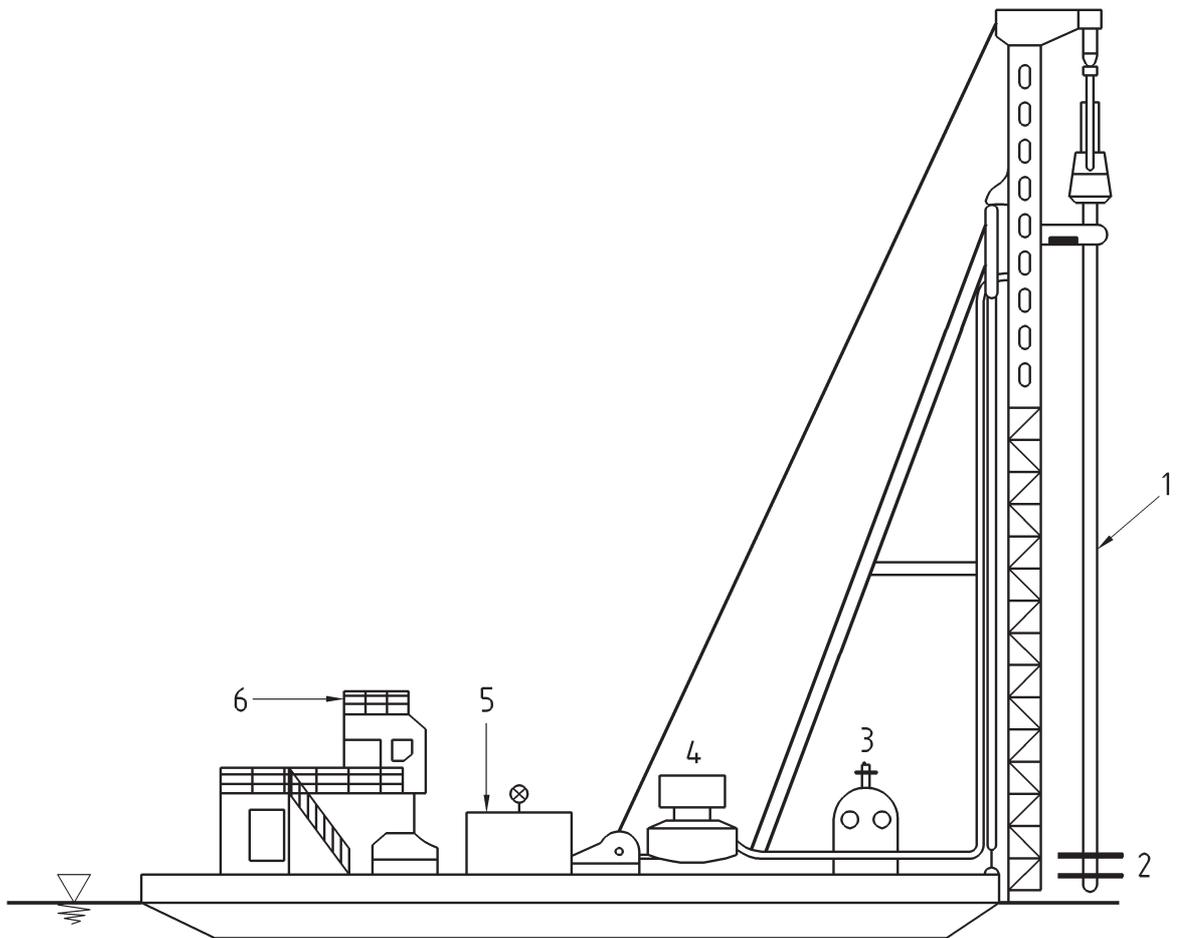
Bei bewehrten Bodenwandkonstruktionen können Stahlstäbe, Bewehrungskörbe aus Stahl oder Stahlträger in die frischen Mixed-in-place-Säulen oder -Elemente eingebaut werden. Für den Einbauprozess kann ein Rüttler erforderlich sein.

### A.3.3.3 Japanische Techniken

In Japan wurde das Nassmischverfahren häufig sowohl für Arbeiten an Land als auch unter Wasser angewendet [5]. An Land wurden Maschinen mit einer, zwei oder vier Mischwellen angewendet. Das Mischwerkzeug ist aus mehreren Einheiten von Mischflügeln zusammengesetzt, um die Homogenität der behandelten Säule zu erreichen. Eine Traverse fixiert den Abstand zwischen den beiden Mischwellen. Diese Traverse und gelegentlich zusätzliche frei rotierende Mischflügel (ohne eigenen Antrieb oder gegenläufig rotierend) wirkt/wirken dem Mitrotieren von an den angetriebenen Mischflügeln und der Mischwelle haftendem Boden entgegen.

Der Umdrehungsindex der Mischflügel und die Bindemittelmenge werden automatisch gesteuert, um die Homogenität der behandelten Säulen zu erreichen. Die Geräte haben mehrere Mischflügel mit einem Durchmesser von 1,0 m bis 1,6 m und können Säulen bis zu einer Tiefe von maximal 48 m einbauen. Die Mischwelle trägt mehrere Mischflügel in verschiedenen Ebenen.

Bei Unterwasseranwendungen werden üblicherweise große Bohrschiffe für die rasche Behandlung beträchtlicher Bodenmassen angewendet, siehe Bild A.7. Auf dem Bohrschiff sind das Mischgerät, eine Dosieranlage, Lagersilos und eine Steuereinheit angeordnet. Die Geräte für Anwendungen unter Wasser besitzen meist mehr als zwei Mischwellen. Die derzeit in Japan zur Verfügung stehenden Geräte für die tiefreichende Bodenstabilisierung erlauben die Herstellung von Säulen mit einem Querschnitt von 1,5 m<sup>2</sup> bis 6,9 m<sup>2</sup> bis zu einer maximalen Tiefe von bis zu 70 m unter dem Meeresspiegel.



**Legende**

- 1 Mischwelle
- 2 Mischflügel
- 3 Kraftwerk
- 4 Einpresspumpe
- 5 Dosieranlage
- 6 Steuereinheit

**Bild A.7 — Japanisches Bohrschiff für die Nassmischung unter Wasser**

Typische Mischbedingungen werden in den Tabellen A.3 und A.4 gezeigt.

**Tabelle A.3 — Wesentliche Leistungs- und Ausführungsmerkmale der europäischen und der japanischen Nassmischtechnik**

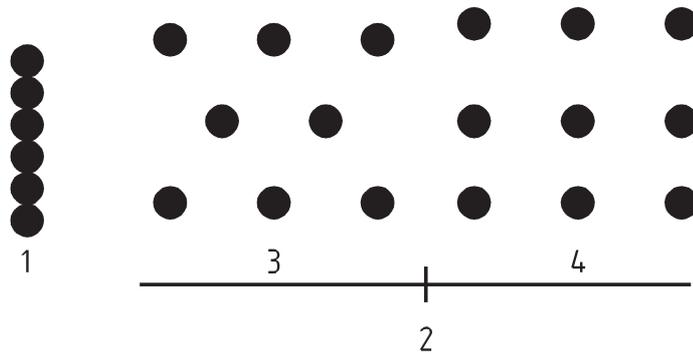
Ausrüstung	Details	An Land/Europa	An Land/Japan	Unter Wasser/Japan
Mischgerät	Anzahl der Mischwellen	1 bis 3	1 bis 4	2 bis 8
	Durchmesser des Mischwerkzeuges	0,4 m bis 0,9 m	1,0 m bis 1,6 m	1,0 m bis 1,6 m
	maximale Behandlungstiefe	25 m	48 m	70 m unter dem Meeresspiegel
	Lage des Bindemittel-auslasses	am Gestänge	an Gestänge und Mischflügel	an Gestänge und Mischflügel
	Injektionsdruck	500 kPa bis 1 000 kPa	300 kPa bis 600 kPa	300 kPa bis 800 kPa
Dosieranlage	vorgehaltene Suspensionsmenge	3 m <sup>3</sup> bis 6 m <sup>3</sup>	3 m <sup>3</sup>	3 m <sup>3</sup> bis 20 m <sup>3</sup>
	Einbringleistung	0,08 m <sup>3</sup> /min bis 0,25 m <sup>3</sup> /min	0,25 m <sup>3</sup> /min bis 1 m <sup>3</sup> /min	0,5 m <sup>3</sup> /min bis 2 m <sup>3</sup> /min
Bindemittel-lagersilo	maximales Fassungsvermögen		30 t	50 t bis 1 600 t

**Tabelle A.4 — Typische Ausführungsparameter der europäischen und der japanischen Nassmischtechnik**

Mischgerät	An Land/Europa	An Land/Japan	Unter Wasser/Japan
Abbohrgeschwindigkeit der Mischwelle	0,5 m/min bis 1,5 m/min	1,0 m/min	1,0 m/min
Ziehgeschwindigkeit der Mischwelle	3,0 m/min bis 5,0 m/min	0,7 m/min bis 1,0 m/min	1,0 m/min
Umdrehungsgeschwindigkeit der Mischflügel	25 U/min bis 50 U/min	20 U/min bis 40 U/min	20 U/min bis 60 U/min
Umdrehungsindex der Mischflügel	meist fortlaufende Bohrschnecke	350 je m	350 je m
eingebraachte Bindemittelmenge	80 kg/m <sup>3</sup> bis 450 kg/m <sup>3</sup>	70 kg/m <sup>3</sup> bis 300 kg/m <sup>3</sup>	70 kg/m <sup>3</sup> bis 300 kg/m <sup>3</sup>
Injektionsphase	Abbohren und/oder Rückziehen	Abbohren und/oder Rückziehen	Abbohren und/oder Rückziehen

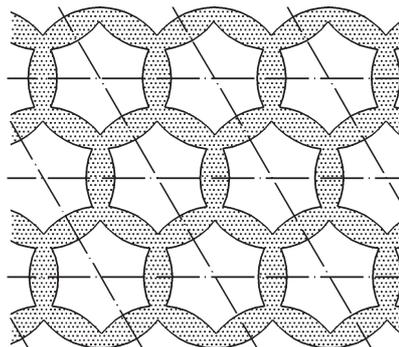
### A.3.4 Einbauraster

Abhängig vom Zweck werden für die tiefreichende Bodenstabilisierung unterschiedliche Säulenordnungen verwendet, siehe Bilder A.8 bis A.11. Besteht das Hauptziel in der Setzungsverringerung, werden die Säulen meist in einem gleichseitigen Dreiecks- oder in einem Rechteckraster angeordnet. Falls hingegen die Stabilität von z. B. Einschnitten oder Dämmen sichergestellt werden soll, werden die Säulen häufig in Wänden rechtwinklig zur erwarteten Gleitfläche ausgerichtet. Eine Überschneidung der Säulen ist von besonderer Bedeutung, wenn die Säulen eine Sicherungsfunktion übernehmen. Eine Überschneidung der Säulen wird üblicherweise bei Anordnungen in Form von Blöcken, Wänden und Gittern erreicht. Ein Beispiel für die Einbaureihenfolge überschchnittener Säulen zur Ausbildung überschchnittener Wände wird auf Bild A.10 dargestellt, wobei die Säulen in U-Form, elliptisch oder kreisförmig angeordnet wirksame Barrieren gegen verschiedene Arten von horizontalen Belastungen bilden (Erddruck, Gleitflächen usw.).

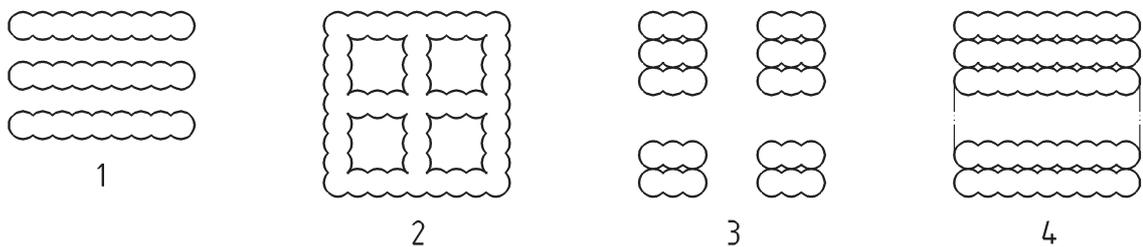


- Legende**
- 1 Streifen
  - 2 Gruppe
  - 3 Dreieck
  - 4 Rechteck

**Bild A.8 — Beispiele von Behandlungsrastern für das Trockenmischverfahren**

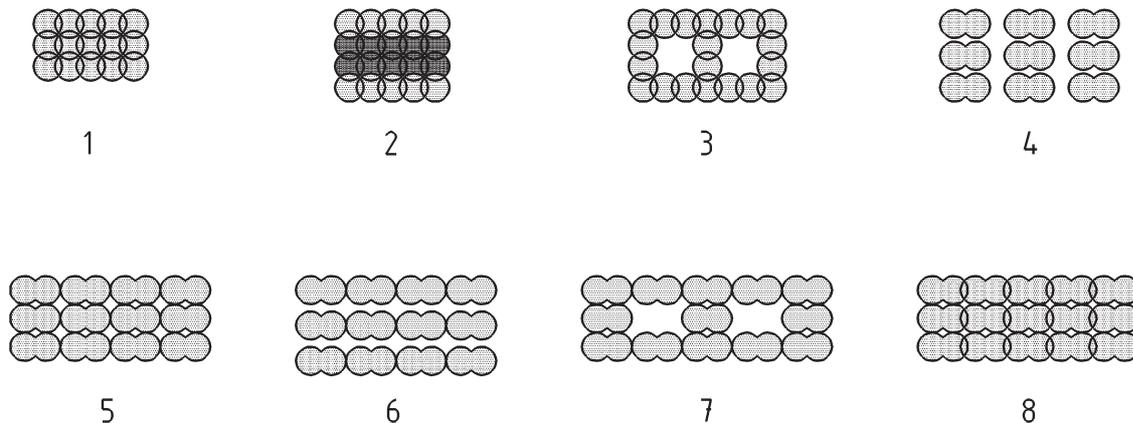


**Bild A.9 — Blockartiger Trockenmischungsraster mit überschrittenen Säulen**



- Legende**
- 1 Wandform
  - 2 Gitterform
  - 3 Blockform
  - 4 flächenförmig

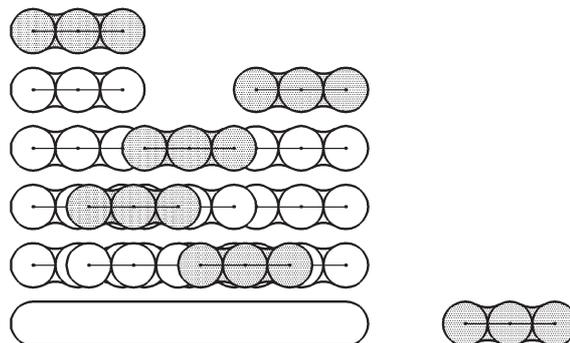
**Bild A.10 — Beispiele von Behandlungsrastern für Nassmischung an Land**



**Legende**

- |              |                       |
|--------------|-----------------------|
| 1 Blockform  | 5 tangentielle Säulen |
| 2 Wandform   | 6 tangentielle Wände  |
| 3 Gitterform | 7 tangentielle Gitter |
| 4 Säulenform | 8 tangentielle Blöcke |

**Bild A.11 — Beispiele von Behandlungsrastern für Unterwasser-Anwendungen**



**Bild A.12 — Beispiel für die Einbaureihenfolge einer mittels des Nassmischverfahrens erzeugten überschnittenen Wand**

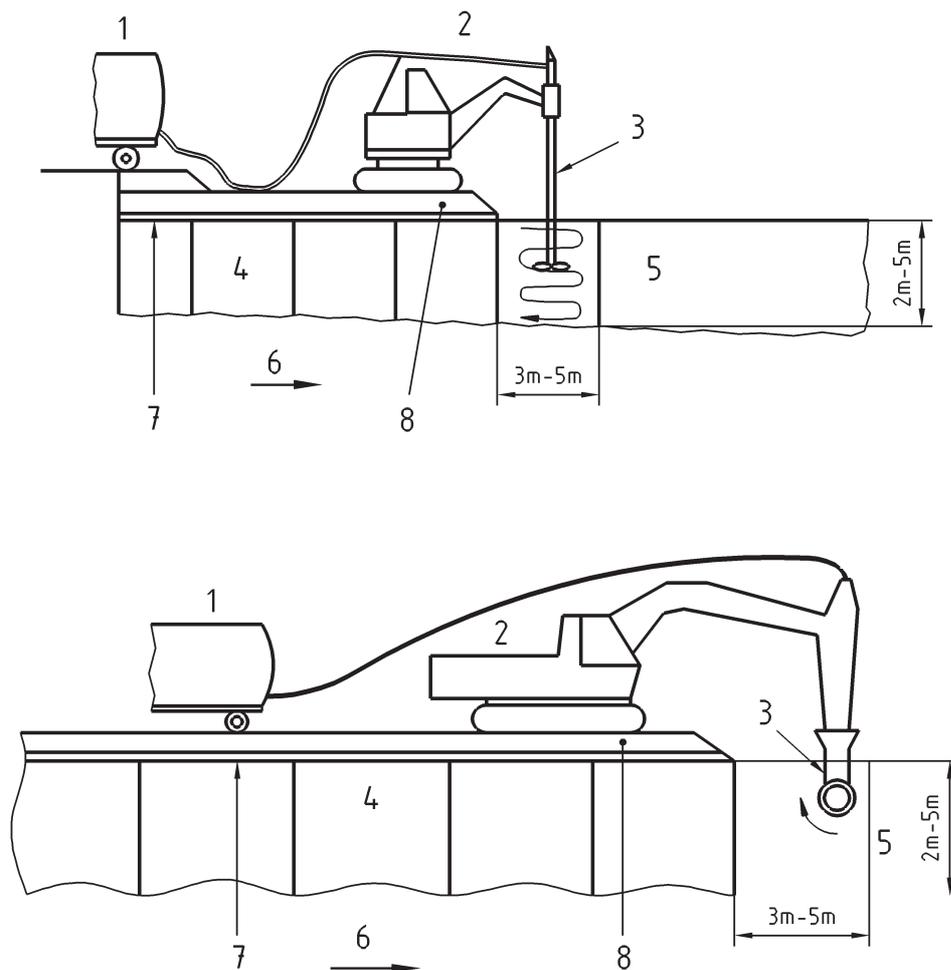
**A.3.5 Hybridtechniken**

**A.3.5.1 Allgemeines**

Bei einer Anzahl von Verfahren werden Techniken angewendet, die der tiefreichenden Bodenstabilisierung ähnlich sind. Diese Techniken, die hier Hybridtechniken genannt werden, unterliegen einer kontinuierlichen Weiterentwicklung, um so besondere Bodenverhältnisse und Gründungsprobleme zu behandeln. Für diese Techniken ist eine Kombination von hydraulischer und mechanischer Mischung typisch. An dieser Stelle werden einige der Hybridtechniken, wie z. B. Massenstabilisierung und Düsenstrahlverfahren in Verbindung mit mechanischer Mischung, beschrieben, die durch ausführende Unternehmen anerkannt sind und praktische Anwendung finden.

### A.3.5.2 Massenstabilisierung

In Fällen außergewöhnlich schlechter Bodenverhältnisse, wie z. B. bei Torf, Mudde, organischem Ton und weichen Tonablagerungen, kann eine Massenstabilisierung erforderlich sein, bei der die gesamte Bodenmasse bis zu einer Tiefe von üblicherweise 2 m bis 3 m behandelt wird. Die maximale Behandlungstiefe liegt derzeit bei 5 m. Die Geräte zur Massenstabilisierung unterscheiden sich wesentlich von den Geräten zur Säulenstabilisierung [7]. Das Bindemittel wird an den Mischkopf gefördert, während das Mischwerkzeug rotiert und gleichzeitig vertikal und horizontal bewegt wird. Meist ist das Gerät zur Massenstabilisierung ein konventioneller Bagger, der jedoch mit einem Mischgerät für die Massenstabilisierung ausgerüstet ist. Zwei verschiedene Technologien zur Massenstabilisierung sind in Bild A.13 dargestellt.



#### Legende

- |   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| 1 Stabilisatorsilo und Waagen                         | 5 Torf, Mudde, weicher Ton          |
| 2 Bagger  | 6 Richtung der Massenstabilisierung |
| 3 Mischwerkzeug                                       | 7 Geotextil-Verstärkung             |
| 4 massenstabilisierte(r) Torf, Mudde oder weicher Ton | 8 Vorbelastung des Damms            |

Bild A.13 — Zwei Arten von Massenstabilisierung

#### A.3.5.3 Düsenstrahlverfahren in Verbindung mit mechanischer Mischung

Es wurde ein neues Verfahren entwickelt, das die Vorteile einer mechanischen Mischung mit Düsenstrahlverfahren verbindet. Die entsprechenden Geräte besitzen sowohl eine Mischwelle als auch Hochdruckdüsen und sind in der Lage, Säulen herzustellen, deren Durchmesser über dem des Mischwerkzeugs liegt. Strahlmischen erleichtert auch das Überschneiden der behandelten Säulen. Der Säulendurchmesser kann verändert werden, indem der Hochdruckstrahl entweder angewendet oder nicht angewendet wird. Das Düsenstrahlverfahren ist in EN 12716 [12] und [22] ausführlich beschrieben.

#### A.3.5.4 Das CDM-LODIC-Verfahren

Ein neues Verfahren der tiefreichenden Bodenstabilisierung mit geringer Bodenverdrängung wurde in Japan mit der Absicht entwickelt, die seitlichen Verdrängungen während der Herstellung auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Zu diesem Zweck wird eine Schnecke im oberen Bereich der Mischwelle angeordnet, um Boden an die Geländeoberfläche zu fördern. Durch das Entfernen einer dem eingebrachten Zementsuspensionsvolumen entsprechenden Bodenmenge kann die Verdrängung des umgebenden Bodens oder naher Konstruktionen reduziert werden [12] und [22].

#### A.3.5.5 Das Fräs-Misch-Injektionsverfahren

Das Fräs-Misch-Injektionsverfahren ist ein deutsches Verfahren, bei dem mittels eines speziellen Geräts, auf Deutsch als Fräsmaschine bezeichnet, lockerer Boden in tiefreichenden Streifen mit Zementsuspension vermischt und homogenisiert werden kann. Das geländegängige, raupenfahrende FMI-Gerät besteht aus einer Fahrerkabine, dem Antrieb und der Fräswelle. Die Fräswelle, auf der die Schneidflügel durch zwei Kettensysteme in Rotation versetzt werden, wird in Richtung der Fahrerkabine gesteuert. Die Fräswelle kann bis 80° geneigt, hinter dem Gerät hergezogen und rechtwinklig zur Betriebsrichtung eingestellt werden. Aufgrund der speziellen Anordnung der Schneidflügel wird der Boden nicht gefördert, sondern *in situ* mit Zementsuspension vermischt. Die Fahrgeschwindigkeit, die Frästiefe und die Rate der Zementeinbringung werden durch einen Computer gesteuert.

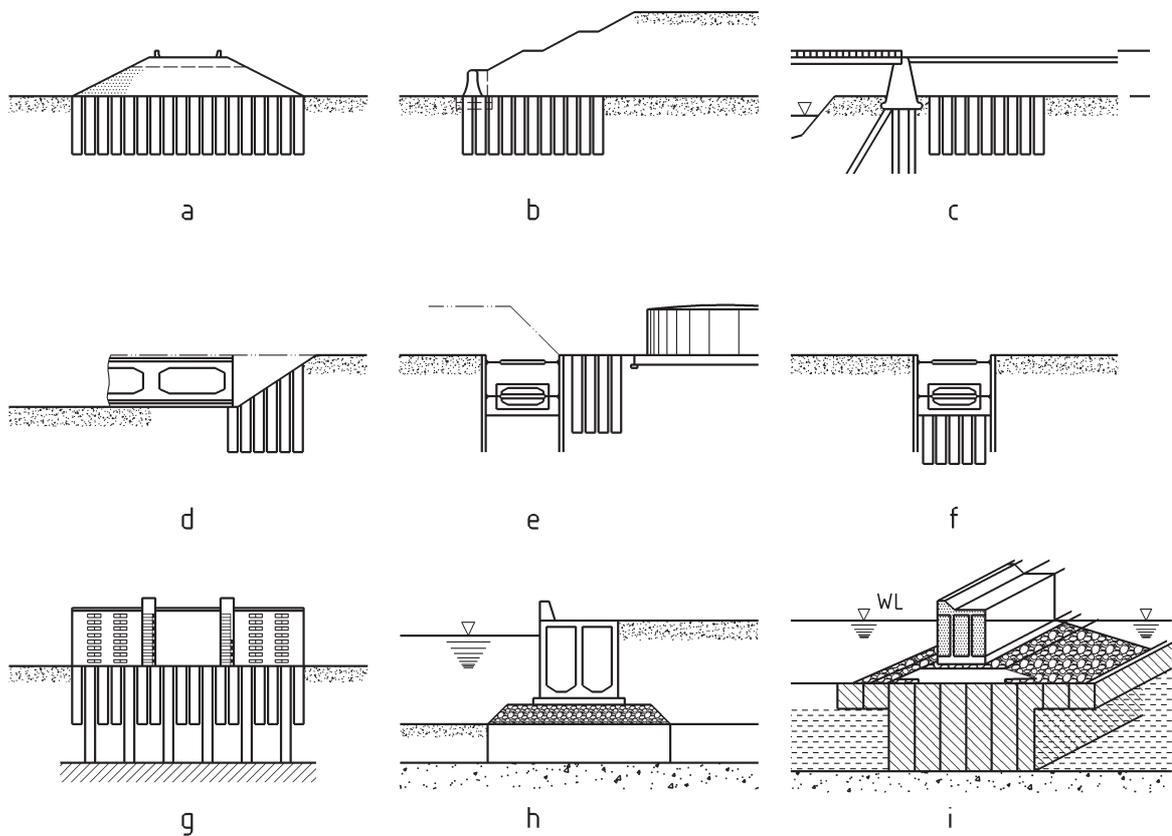
Die Fräswelle ist mit einem Einbringungsrohr und Einbringungsauslässen versehen. Die Zementsuspension wird außerhalb des Geräts gemischt und über das Einbringungsrohr zur Fräswelle transportiert. Die mittlere Suspensionseinbringungsmenge liegt bei 100 m<sup>3</sup>/h. Das Verfahren erlaubt eine Bodenbehandlung bis zu einer Tiefe von maximal 9 m. Die Fräsbreite beträgt bis 6 m Tiefe 1,0 m und bis 9 m Tiefe 0,5 m [20].

### A.4 Herstellungsbezogene Überlegungen

Es muss die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, dass es bei der Ausführung der tiefreichenden Bodenstabilisierung zu Bodenverdrängungen kommen kann, die die Stabilität von Hängen beeinträchtigen oder Probleme bei empfindlichen Bauwerken erzeugen können. Beispiele für die Anwendung der tiefreichenden Bodenstabilisierung zum Zweck der Setzungsverringerung und der Stabilitätserhöhung, und damit als Vorkehrung gegenüber schädlichen Auswirkungen auf nahe gelegene Konstruktionen und als Stützwand für tiefe Baugruben, werden in Bild A.14 gegeben.

Die chemischen Reaktionen zwischen Boden und Bindemittel erzeugen eine Temperaturerhöhung im Boden, die bis zum Ende der chemischen Reaktionen andauert.

Der Betrieb der Mischausrüstung muss unter strikter Einhaltung der erforderlichen Sicherheitsvorkehrungen erfolgen. Die Reaktion zwischen ungelöschtem Kalk und Luftfeuchtigkeit oder Wasser ist hochgradig exotherm. Die daraus resultierende rasche Volumenausdehnung und Hitzeentwicklung können zur Entzündung oder zu einer Explosion führen. Als Vorkehrung gegen die ätzende und giftige Wirkung sollten sowohl dicht schließende Schutzbrillen als auch Schutzhandschuhe und eine Staubmaske getragen werden. Auch Zement hat eine ätzende Wirkung.



### Legende

- a Stabilität/Setzung von Straßendämmen
- b Stabilität hoher Dämme
- c Differenzsetzungen von Brückenwiderlagern
- d Stabilität von Hangeinschnitten
- e Verringerung des Einflusses naher Bauwerke
- f Baugrubenaussteifung gegen Erddruck/Hebung
- g Seitliche Bettung von Pfahlgründungen
- h Tragfähigkeit von Hafendämmen
- i Tragfähigkeit von Wellenbrechern

**Bild A.14 — Verschiedene Anwendungen der tiefreichenden Bodenstabilisierung.  
Nach der CDM-Association [23]**

## **Anhang B (informativ)**

### **Aspekte der Bemessung**

#### **B.1 Allgemeines**

##### **B.1.1 Anwendungsbereich**

Die in diesem Anhang behandelten Aspekte der Bemessung beziehen sich auf die Ausarbeitung der Ausführungsplanung, die Bindemittelauswahl, Labor- und Feldversuche und den Einfluss der Säulenordnung und deren Funktionsweise auf die Bemessung. Dieser Anhang befasst sich nicht mit den detaillierten Grundsätzen und Verfahren der geotechnischen Bemessung, hinsichtlich derer auf EN 1997-1 verwiesen wird.

Da die tiefreichende Bodenstabilisierung ein Bodenverbesserungsverfahren ist, umfasst die Planung zwei unterschiedliche Aspekte:

- die funktionale Bemessung beschreibt die Art, auf die der behandelte Boden und der unbehandelte Boden zusammenwirken müssen, damit das angestrebte Gesamtverhalten erreicht wird;
- die Ausführungsplanung beschreibt die Maßnahmen, durch welche die erforderlichen Leistungseigenschaften des behandelten Bodens erreicht werden, was durch Auswahl und Modifizierung der Prozesssteuerungsparameter erfolgt.

##### **B.1.2 Anwendung**

Der Anwendungsbereich der tiefreichenden Bodenstabilisierung besteht in der Behandlung und der Lösung von Problemen im Zusammenhang mit folgenden Aspekten:

- Setzungsverringering (z. B. bei Dämmen und Konstruktionen);
- Verbesserung der Stabilität (Konstruktionen und Dämme);
- Abstützung von Hängen und Aushubfronten;
- Verbesserung der Tragfähigkeit, Verringerung von durch dynamische und zyklische Belastungen verursachten Setzungen und seitlichen Verdrängungen (z. B. in Erdbebenzonen);
- Immobilisierung und/oder Einkapselung von Müllablagerungen oder verunreinigten Böden;
- Konstruktion von Sicherungsbauwerken;
- Verringerung von Vibrationen und deren Auswirkungen auf Menschen und Konstruktionen.

#### **B.2 Bemessungsgrundsätze**

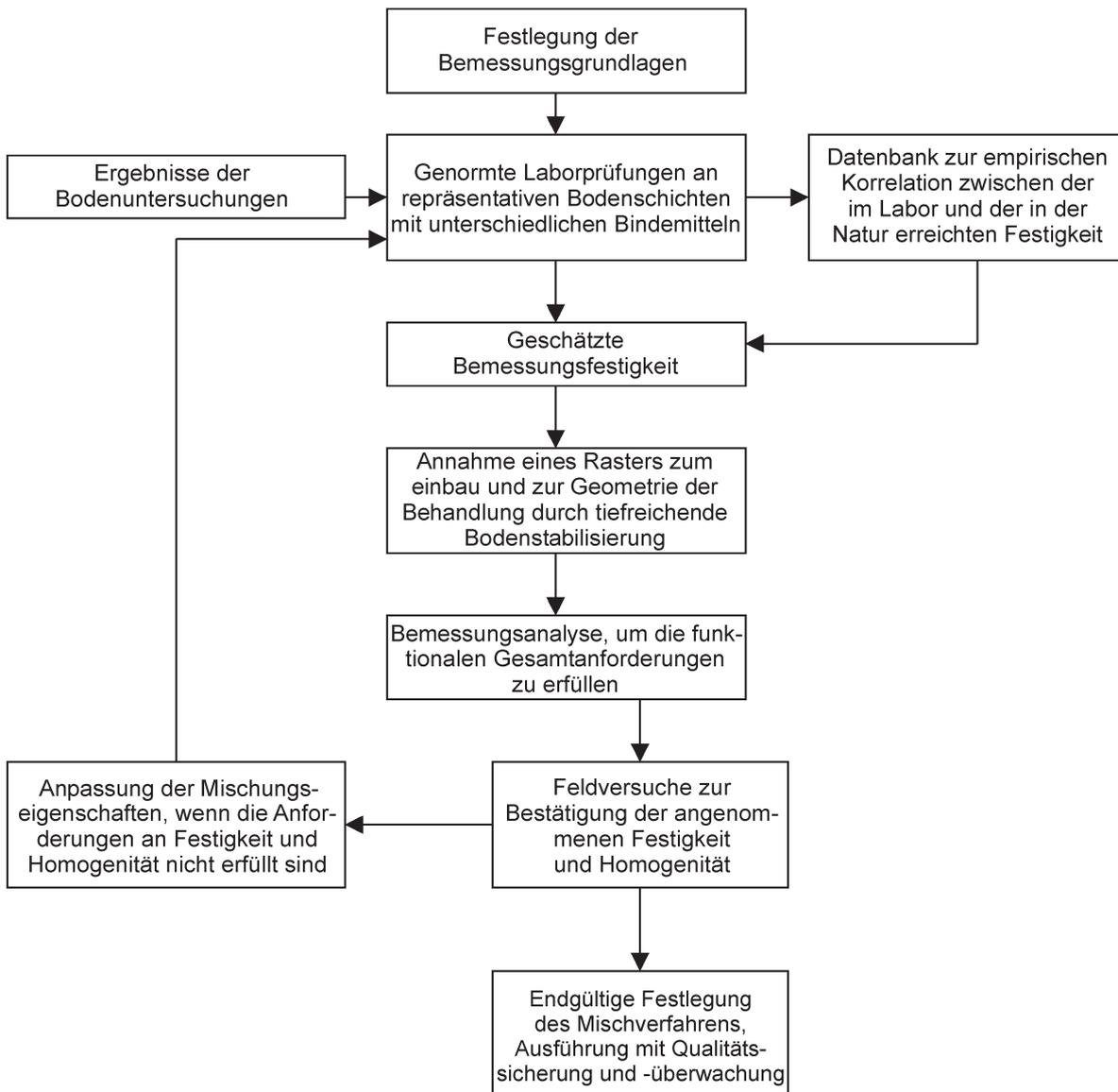
Hinsichtlich des mittels der tiefreichenden Bodenstabilisierung behandelten Bodens müssen Bemessung und Ausführung in einer Weise erfolgen, dass die unterstützte Konstruktion während der vorgesehenen Lebensdauer und bei angemessener Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit für den vorgesehenen Zweck gebrauchstauglich bleibt und allen während der Ausführung und der Nutzungszeit zu erwartenden Einwirkungen und Einflüssen widersteht. Somit wird verlangt, dass der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und der der Tragfähigkeit erfüllt werden.

Die Anforderungen an den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und den der Tragfähigkeit sind durch den Kunden festzulegen. Die Planung muss den Anforderungen der EN 1997-1 entsprechen.

Ein wichtiger Teil der Bemessung ist die so genannte iterative Bemessung, die auf der Untersuchung von durch verschiedene Prüfverfahren gewonnenen Ergebnissen beruht. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf den Faktoren, die für die Ausführung und den eigentlichen Zweck der tieferreichenden Bodenstabilisierung von Bedeutung sind.

Die Planung wird für die ungünstigsten Lastenkombinationen durchgeführt, die während der Herstellung und der Gebrauchsdauer auftreten können.

Der Prozess der tieferreichenden Bodenstabilisierung kann als Folge erzeugter Porenwasserüberdrücke und Bodenverdrängungen einen kurzzeitigen Abfall des Widerstands des Bodens gegen Bruch verursachen. Die Mixed-in-place-Säulen sollten so angeordnet werden, dass mögliche Schwächezonen in einzelnen Säulen keinen negativen Einfluss auf die Stabilität haben. Bei der Stabilitätsanalyse ist es wichtig, die Unterschiede zwischen behandeltem und unbehandeltem Boden im Spannungs-Dehnungs-Verhältnis zu berücksichtigen. Für Baugrubensicherungen stellen die Druckfestigkeit des behandelten Bodens und die Gewölbewirkung die wesentlichsten Parameter dar. Bild B.1 beschreibt den iterativen Prozess der Kombination von funktionaler und ausführungstechnischer Bemessung.



**Bild B.1 — Iterativer Bemessungsprozess einschließlich Laborversuchen, funktionaler Bemessung, Feldversuchen und Ausführungsplanung**

### B.3 Ausführung der tiefreichenden Bodenstabilisierung

Der Sinn genormter Laborprüfungen (Labormischungsprüfungen) besteht darin, Informationen zur für das jeweilige Bauvorhaben geeigneten Bindemittelart und Dosierung zu liefern. Die Prüfungen sollten jede repräsentative Bodenschicht umfassen. In den meisten Fällen besteht ein Unterschied zwischen den im Labor und den in der Natur erreichten Festigkeiten. Die vorläufige Ausführungsplanung stützt sich, wie in Bild B.1 gezeigt, auf Laborergebnisse, vorliegende Daten und Informationen auf der Grundlage ähnlicher Erfahrungen. Vor der tatsächlichen Ausführung werden mit Hilfe von tiefreichender Bodenstabilisierung Prüfsäulen hergestellt, an denen Feldversuche durchgeführt werden, um zu bestätigen, dass durch Bindemittelart, Dosierung und Mischenergie die geforderte Festigkeit und Homogenität erreicht werden können. Falls in den Feldversuchen die Anforderungen der Planung nicht erfüllt werden, sind die funktionale Bemessung und die Ausführungsplanung zu überdenken.

## B.4 Auswahl des Bindemittels

Die beim Trockenmischverfahren verwendeten Bindemittel bestehen üblicherweise aus Zement oder einer Mischung aus Kalk und Zement; beim Nassmischverfahren wird meist Zement verwendet. Die Auswahl des Bindemittels ist ein kritischer Aspekt der tiefreichenden Bodenstabilisierung, der stark von den Bodenverhältnissen und dem Zweck der tiefreichenden Bodenstabilisierung abhängt. Das Prüfen von Bindemitteln zusammen mit dem zu behandelnden Boden ist meist eine wesentliche Anforderung an jedes Projekt der tiefreichenden Bodenstabilisierung. Eine Zusammenfassung der üblicherweise verwendeten Bindemittel wird in Tabelle B.1 angegeben.

**Tabelle B.1 — Für das Trockenmischverfahren üblicherweise verwendete Bindemittel**

Bodenart	Geeignete Bindemittel
Ton	Kalk oder Kalk/Zement
Quickton	Kalk oder Kalk/Zement
Organischer Ton und Mudde	Kalk/Zement oder Zement/körnige Hochofenschlacke oder Kalk/Gips
Torf	Zement oder Zement/körnige Hochofenschlacke oder Kalk/Gips/Zement
Sulfatböden	Zement oder Zement/körnige Hochofenschlacke
Schluff	Kalk/Zement oder Zement

Das Bindemittel für das Nassmischverfahren ist in den meisten Fällen Zement. Für hochgradig organische und besonders weiche Böden mit hohem Wassergehalt können speziell aufbereitete Bindemittel verwendet werden. Wird bei dem behandelten Boden eine geringe Festigkeit angestrebt, können Mischungen aus Flugasche, Gips und Zement verwendet werden. Bentonit wird häufig verwendet, um die Rheologie zu verbessern und die Suspensionsmischungen zu stabilisieren.

## B.5 Prüfung

### B.5.1 Allgemeines

Das Prüfverfahren muss an den Zweck der tiefreichenden Bodenstabilisierung angepasst sein. Während für eine Setzungsverringern der Elastizitätsmodul von besonderer Bedeutung ist, ist für die Stabilitätssteigerung und die Verhinderung von Geländebrüchen die Festigkeit der Säule von größtem Interesse. Im Hinblick auf die Immobilisierung und/oder die Einkapselung von Müllablagerungen oder verunreinigten Böden und die Sicherungsfunktion sind die Überschneidung und die geringe Durchlässigkeit der Säulen die bestimmenden Faktoren.

### B.5.2 Laborprüfungen

#### B.5.2.1 Allgemeines

Laborprüfungen stellen eines der Mittel für die Analyse der Möglichkeiten zur Behandlung eines vorhandenen Bodens und für die Überprüfung der Ergebnisse der tiefreichenden Bodenstabilisierung dar. Sie beziehen einerseits im Labor gemischte Bodenproben und andererseits in unterschiedlichen Tiefen aus eingebauten Säulen entnommene Proben ein.

#### B.5.2.2 Labormischung von Proben

Die im Labor gemischten Proben stellen eine Möglichkeit dar zu untersuchen, welche Bindemittelmenge und -art oder welche Kombination aus Bindemittel/Füller/Zusatzmittel, welcher Bindemittelfaktor und welches Wasser/Bindemittel-Verhältnis erforderlich sind, um den Boden in der beabsichtigten Weise zu stabilisieren.

## EN 14679:2005 (D)

Für die Laboruntersuchung von Boden/Bindemittel-Proben wird auf die folgenden Verfahren in den Planungsrichtlinien verwiesen [6]:

- 1) Laborverfahren zur Vorbereitung und Lagerung von Proben aus mit Bindemittel stabilisiertem Boden für Anwendungen in Säulen der tiefreichenden Bodenstabilisierung;
- 2) Laborverfahren zur Vorbereitung und Lagerung von Proben aus mit Kalk und zementartigen Materialien stabilisiertem Boden (speziell Torf) für Anwendungen zur Massenstabilisierung.

**ANMERKUNG** Die Laborverfahren für die Vorbereitung und Lagerung von Bodenproben für die japanischen Trocken- und Nassmischtechniken wurden durch die Japanische Geotechnische Gesellschaft genormt.

Die Korrelation zwischen den festigkeitsbezogenen Eigenschaften von im Labor gemischten Proben und den entsprechenden Eigenschaften in der Natur ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Wenn umfangreiche Erfahrungen hinsichtlich der Korrelation zwischen der Festigkeit von im Labor gemischten Proben und den entsprechenden Eigenschaften von Säulen, die in Böden eingebaut wurden, die denselben geologischen Ursprung haben wie die Laborproben, zur Verfügung stehen, kann ein herkömmlicher Korrelationskoeffizient angewendet werden. Es sollten ein Mischwerkzeug und ein Bindemittel vom selben Typ sowie derselbe Bindemittelgehalt wie beim Bezugsobjekt verwendet werden.

### B.5.2.3 Kernproben

Kernproben können mittels einer Rotationskernbohrausrüstung entnommen werden. Kernproben können zur Untersuchung des Verformungsverhaltens, der Festigkeit und der Homogenität herangezogen werden. Die Wahl der Kernbohrtechnik und des Bohrkerndurchmessers wird in hohem Maße durch die Festigkeit und die Qualität des behandelten Bodens bestimmt. Für Säulen in weichen Böden werden Dreifachkernrohre empfohlen. Die Anzahl der Kerne hängt von der Größe und/oder der Komplexität des Projekts ab. Mindestens drei Kernbohrungen werden für die Ausführung empfohlen. Die Probennahme sollte die volle Behandlungstiefe abdecken. Grundsätzlich unterscheidet sich die Festigkeitszunahme beim Trockenmischverfahren von der beim Nassmischverfahren. Sie wird durch den Feuchtigkeitsgehalt und die Hydratationseigenschaften des Bindemittels beeinflusst. Die Temperatur hat wesentliche Auswirkungen auf die Erhöhung der Festigkeit. Die Erhöhung der Temperatur im Boden aufgrund des Hydratationseffekts des Bindemittels hängt von verschiedenen Parametern, wie z. B. der Bindemittelart, dem Bindemittelfaktor/-gehalt und der behandelten Bodenmenge ab. Störungen der Proben können von großer Bedeutung sein und die Probeneigenschaften beeinflussen. Die Entnahme von Kernproben sollte durch weitere Prüfverfahren entsprechend der nachfolgenden Auflistung ergänzt werden.

Die Festigkeitseigenschaften und der Elastizitätsmodul  $E_{col}$  der Proben werden üblicherweise durch einen Druckversuch mit unbehinderter Seitendehnung bestimmt. Jedoch werden die so erhaltenen Ergebnisse durch das Vorhandensein von Rissen in den Proben beeinflusst. Sind Risse zu beobachten, ist ein Triaxialversuch vorzuziehen (siehe prEN 1997-2).

Der Zusammendrückbarkeitsmodul  $M_{col}$  der Proben wird durch Ödometerprüfungen ermittelt (siehe prEN 1997-2). Für die Abschätzung des Setzungsverhaltens von stabilisiertem Boden ist der Elastizitätsmodul der Säule eher repräsentativ als der Steifemodul. Wird in der Setzungsanalyse, anstelle des Elastizitätsmoduls der Säule, der Steifemodul angewendet, führt dies zu einer Unterschätzung der Langzeitsetzungen [1].

Prüfungen der hydraulischen Leitfähigkeit erfordern eine speziell für den jeweiligen Fall hergestellte Ausrüstung, da keine Standardgeräte existieren. Die Durchlässigkeit kann jedoch durch eine Rückrechnung aus dem Wert für den in der Ödometerprüfung bestimmten Konsolidierungskoeffizienten geschätzt werden.

#### B.5.2.4 Nassgreiferproben

Nassgreiferprobenahmen kommen bei der europäischen Nassmischtechnik zur Anwendung. Diese Proben werden vor der Anfangssetzung des behandelten Bodens entnommen. Ihre Entnahme erfolgt mit einem geeigneten Probenahmegerät in kritischen Tiefen der Säulen; üblicherweise wird eine Probe je 500 m<sup>3</sup> behandelter Boden bzw. eine Probe je Tag entnommen. Die Proben werden erhalten, indem ein leeres Nassgreiferprobenahmegerät auf die Beprobungstiefe abgesenkt, die flüssige Probe eingefüllt, das Entnahmegerät verschlossen und die Probe an die Bodenoberfläche gefördert wird, wo der gewonnene Inhalt verarbeitet und in Prüfzylinder umgefüllt wird. Die Proben werden bei einer festgelegten Temperatur in zylindrischen oder kubischen Probenformen mit genormter Größe aushärten gelassen. Die oben beschriebene Prüfung der Proben wird üblicherweise nach 7 Tagen sowie nach 28 Tagen Aushärtung durchgeführt. Die Aushärtungsbedingungen des behandelten Bodens *in situ* auf der einen und die der Nassgreiferbodenproben auf der anderen Seite unterscheiden sich voneinander und beeinflussen die Festigkeit und die Geschwindigkeit der Festigkeitszunahme.

### B.5.3 Felduntersuchungen

#### B.5.3.1 Feldversuche

Aufgrund der Unsicherheit hinsichtlich der Anwendbarkeit von im Labor bestimmten Säuleneigenschaften sind *In-situ*-Prüfungen erforderlich. Eine der wesentlichsten Untersuchungen, nämlich die der Homogenität der Säulen, kann durch einige Arten von Sondierungen, durch die oben beschriebenen Kernbohrungen und/oder durch das Ausheben ganzer Säulen erfolgen. Die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften und der hydraulischen Leitfähigkeit der Säulen erfordert eine spezielle Ausrüstung. Ein entsprechender Feldversuch umfasst üblicherweise den Einbau von zwei bis drei Säulen mit unterschiedlichem Bindemittelgehalt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Feldversuche ist die Festlegung der Kriterien für die Ausführungskontrolle der tiefreichenden Bodenstabilisierung. Die Kontrollparameter können die Abbohr- und die Ziehgeschwindigkeit des Mischwerkzeugs, dessen Umdrehungsgeschwindigkeit und Drehmoment, die Überschneidungsbreite und die Förderrate des Bindemittels/der Suspension umfassen. Wenn die Säule in einer festen Tragschicht gegründet werden soll, werden das Drehmoment und/oder die Änderung des Abbohrwiderstands gemessen, um die kritischen Parameter der Ausführungskontrolle festzulegen.

#### B.5.3.2 Direkte Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

Pressiometerprüfungen (siehe prEN 1997-2) können als Grundlage für die Ermittlung der Scherfestigkeit und der Zusammendrückbarkeit der Säule dienen. Die Prüfungen erfordern eine Vorbohrung in der Säule, in die eine Pressiometersonde eingeführt wird.

Geophysikalische Prüfungen dienen als Grundlage für die Ermittlung der Eigenschaften von behandeltem Boden unter dynamischer Belastung und können für die Untersuchung der Integrität der Säulen sowie auch für die indirekte Ermittlung des Verformungsmoduls und der Festigkeit herangezogen werden. Die Interpretation der Ergebnisse von geophysikalischen Prüfungen befindet sich derzeit jedoch noch im Forschungsstadium.

#### B.5.3.3 Untersuchung der Homogenität und indirekte Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

CPT-Prüfungen in Form von herkömmlichen Konusdurchdringungsprüfungen werden zur Bestimmung der Festigkeitsparameter und des unterbrechungsfreien Verlaufs der Säulen angewendet. Das CPT-Verfahren unterliegt, verglichen mit einer Säulendurchdringungsprüfung, potentiellen Beschränkungen hinsichtlich der Beibehaltung der Vertikalität. Aufgrund der Größe seiner Spitze erfasst der Konus in der Konusdurchdringungsprüfung darüber hinaus nur einen begrenzten Ausschnitt des Säulenvolumens. Oft ist eine schrittweise Vorbohrung erforderlich, um den Prüfkonus in der Säule zu halten.

Statische/dynamische Abbohrprüfungen, die eine Kombination aus einer Abbohr- und einer Schlagrammenprüfung darstellen, sind für behandelten Boden mit einer unbegrenzten Druckfestigkeit  $\leq 4$  MPa geeignet.

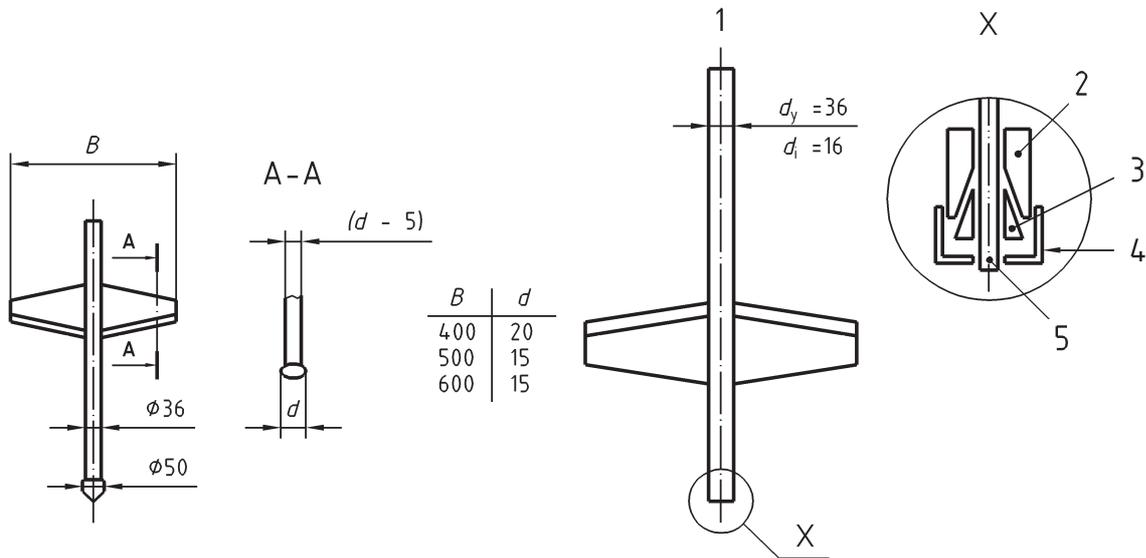
Eine Säulendurchdringungsprüfung (siehe Bild B.2) wird unter Anwendung einer Sonde durchgeführt, die mit einer Geschwindigkeit von etwa 20 mm/s unter gleichzeitiger ständiger Aufzeichnung des Abbohrwiderstands in das Zentrum der Säule hineingedrückt wird. Die Sonde ist mit zwei einander gegenüberliegenden Flügeln ausgestattet. Das Verfahren kann üblicherweise in Säulen mit einer Länge bis maximal 8 m und mit einer einaxialen Druckfestigkeit < 300 kPa angewendet werden. Bei längeren Säulen kann die Sonde aus der Säule heraus in den umgebenden Boden eindringen. Dies kann durch eine vertikale Vorbohrung in das Zentrum der Säule verhindert werden. Die Vorbohrung sollte ohne Schlag erfolgen. Mit einer Vorbohrung kann die Säulendurchdringungsprüfung für Säulen mit einer maximalen einachsialen Druckfestigkeit von 600 kPa bis 700 kPa und bis zu einer Tiefe von 20 m bis 25 m angewendet werden.

Durch die umgekehrte Säulendurchdringungsprüfung kann die Homogenität der Säule entlang ihrer gesamten Länge bestimmt werden. Bei dieser Prüfung wird eine Sonde, die mit Flügeln ausgestattet ist, die denen der Säulendurchdringungsprüfung entsprechen, an einem Drahtseil befestigt, das bereits während der Herstellung der Säule unter deren Fuß eingebaut wurde. Das Drahtseil, das eine Mindestfestigkeit von 150 kN aufweisen sollte, verläuft durch die gesamte Säule bis an die Bodenoberfläche. Die Säulenfestigkeit wird aus der Messung des Widerstands beim Ausziehen der Sonde an die Bodenoberfläche ermittelt. Das Ausziehen sollte bei einer Geschwindigkeit von etwa 20 mm/s erfolgen. Die Auswahl der Flügelart sollte der für die Säulendurchdringungsprüfung empfohlenen Auswahl entsprechen. Wie bereits erwähnt, kann das Verfahren eher als ein Maß für die Veränderlichkeit der Säulenfestigkeit mit der Tiefe als ein direktes Maß für die Scherfestigkeit herangezogen werden. Das Verfahren ist derzeit noch in Entwicklung.

**B.5.3.4 Prüfungen der hydraulischen Leitfähigkeit**

Druck-Permeameterprüfungen werden auf ähnliche Weise wie die Pressiometerprüfungen angewendet und können als Grundlage für die Ermittlung der Durchlässigkeit der Säule in radialer Richtung dienen.

Um die hydraulischen Eigenschaften in der Natur zu bewerten, können verschiedene Arten von Feldversuchen angewendet werden. Allerdings existiert keine Standardausrüstung für die Bestimmung der Durchlässigkeit.



**Legende**

- 1 Supra-Drahtseil, 1/2 Inch
- 2 Rohr,  $d_y = 36$  mm, am Ende mit Gewinde versehen
- 3 Verkeilung für das Supra-Drahtseil
- 4 mit Innengewinde versehenes Hüllrohr der Sondierstange
- 5 Supra-Drahtseil, 1/2 Inch

**Bild B.2 — Flügel zur Anwendung für die herkömmliche (links) und die umgekehrte Säulendurchdringungsprüfung**

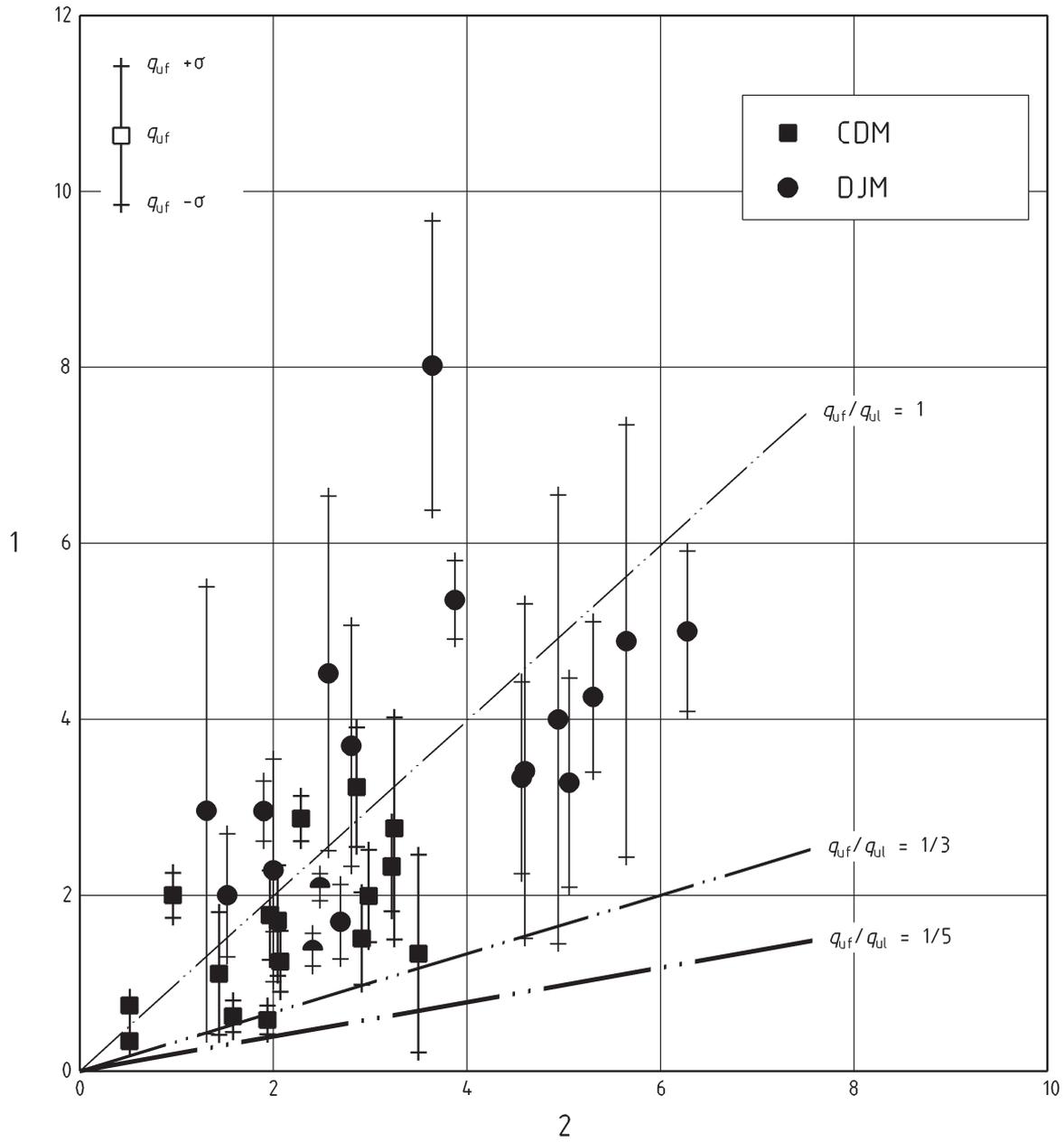
## B.6 Korrelation zwischen verschiedenen Eigenschaften von behandeltem Boden

### B.6.1 Festigkeit in der Natur und im Labor

Unterschiedliche Misch- und Aushärtungsbedingungen bewirken den Unterschied zwischen Böden, die in der Natur, und solchen, die im Labor gemischt werden. Wie in Abschnitt 5 erwähnt, ist die Vorgehensweise bei Laborprüfungen in Europa und in Japan unterschiedlich. In jeder der Regionen werden unterschiedliche Mischwerkzeuge angewendet, wodurch der allgemeine Vergleich der in der Natur und der im Labor erhaltenen Festigkeit erschwert wird. Allerdings ist bei Anwendung der gleichen Mischwerkzeuge unter einem genormten Qualitätskontrollsystem und auf der Grundlage von Erfahrungen ein Vergleich zwischen Böden, die in der Natur, und solchen, die im Labor behandelt wurden, möglich.

Entsprechend der schwedischen Erfahrung mit dem Trockenmischverfahren in weichen plastischen Tonen liegt das Verhältnis der Festigkeit in der Natur zur Laborfestigkeit bei 0,2 bis 0,5. In nichtbindigen Böden ist ein deutlich höheres Verhältnis zu erwarten. In solchen Böden bestimmt der Gehalt an Feinanteilen weitestgehend das Verhältnis.

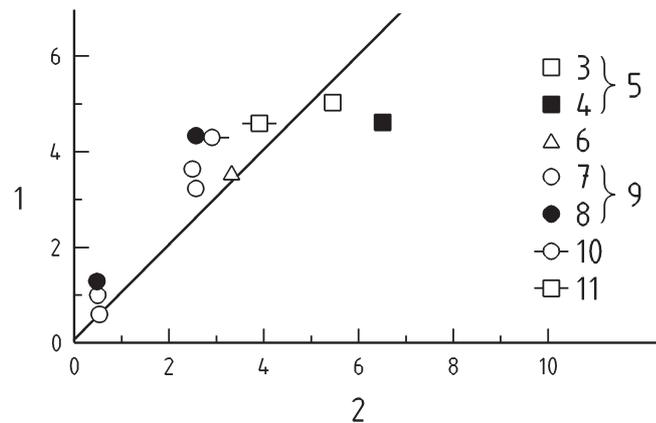
Für das CDM-Verfahren (Verfahren der tiefreichenden Bodenstabilisierung mit Zement, en: Cement Deep Mixing Method) — dem in Japan verbreitetsten Nassmischverfahren — hat die CDM-Association den Prozess der Qualitätskontrolle und den Mindestumdrehungsindex der Mischflügel festgelegt. Das typische Trockenmischverfahren — das DJM-Verfahren (Trockenstrahlmischverfahren, en: Dry Jet Mixing Method) — wendet ein vom selben Hersteller geliefertes Mischwerkzeug an. Japanische Erfahrungen auf der Grundlage von Daten zu CDM und DJM an Land sind in Bild B.3, für CDM-Arbeiten in Bild B.4 zusammengefasst.



**Legende**

- 1 Feldfestigkeit  $q_{uf}$ , MPa
- 2 Laborfestigkeit  $q_{ul}$ , MPa

**Bild B.3 — Beziehung zwischen Festigkeitswerten aus Feldversuchen und Laborprüfungen für Bauwerke an Land [19]**



### Legende

- 1 unbehinderte Druckfestigkeit von *in situ* behandeltem Boden,  $q_{uf}$ , MPa,
- 2 unbehinderte Druckfestigkeit von im Labor behandeltem Boden,  $q_{ul}$ , MPa
- 3 Ton } 5
- 4 Sand } 5 Pier von Daikoku
- 6 Ton, Hafen von Hatsukaichi
- 7 schluffiger Ton } 9
- 8 sandiger Schluff } 9 Hafen von Kanda
- 10 Hafen von Chiba
- 11 Hafen von Kitakyushu

**Bild B.4 — Beziehung zwischen Festigkeitswerten aus Feldversuchen und Laborprüfungen für Bauwerke unter Wasser [5]**

## B.6.2 Beziehung zwischen den mechanischen Eigenschaften und der einachsialen Druckfestigkeit

Für die Bemessung sind häufig Werte für die Biegefestigkeit, die Zugfestigkeit, den Elastizitätsmodul und die Durchlässigkeit erforderlich. Diese Kennwerte können nach der Herstellung aus Kernproben von *in situ* behandeltem Boden gewonnen werden. In der Bemessungsphase sollten jedoch auf der Grundlage zuverlässiger Daten angemessene Annahmen hinsichtlich dieser Werte getroffen werden. Für die japanische Nassmischtechnik existiert eine große Anzahl von Daten, die vom Coastal Development Institute of Technology in Japan zusammengetragen werden [5].

## B.7 Aspekte der Planung

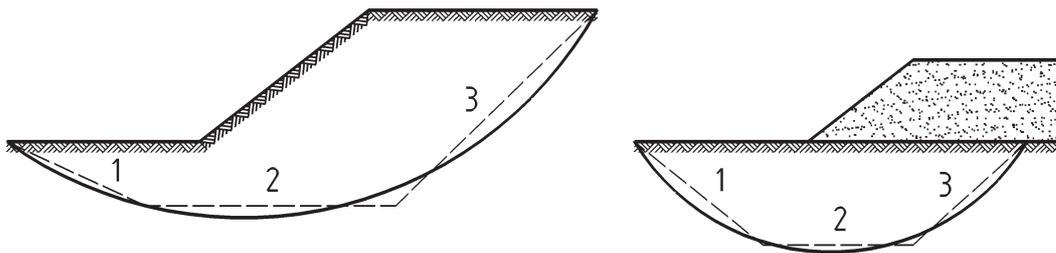
### B.7.1 Stabilität

#### B.7.1.1 Gewichtete Scherfestigkeit

Häufig besteht die Funktion der behandelten Säulen in der Stabilisierung von Hängen, Dämmen oder Grabenwandungen. In diesem Fall sollten die Säulen vorzugsweise auf beiden Seiten in einer Anzahl von Wänden rechtwinklig zur Falllinie des Hanges, des Dammes oder des Grabens angeordnet werden (siehe Anhang A). Die Stabilität wird auf der Grundlage der gewichteten mittleren Festigkeit des unbehandelten Bodens und der Säulen analysiert. Das Auftreten eines Bruches wird üblicherweise entlang einer ebenen oder gekrümmten Gleitfläche angenommen, in der sowohl die Scherfestigkeit der Säulen als auch die des umgebenden Bodens aktiviert ist.

**B.7.1.2 Einfluss der Säulenordnung entlang einer potentiellen Gleitfläche**

Im Fall der Anwendung von Einzelsäulen für Stabilisierungszwecke muss das Risiko eines Biegebruchs der Säulen berücksichtigt werden. Die Säulen verhalten sich unterschiedlich, je nachdem, ob sie sich im aktiven Bereich, in der mehr oder weniger reinen Scherzone oder im passiven Bereich der potentiellen Gleitfläche befinden (siehe Bild B.5). Im aktiven Bereich trägt die axiale Last auf die Säule zur Erhöhung des Scher- oder des Biege widerstands bei, während die Säulen im passiven Bereich sogar bei Zug versagen können. Daher tragen die Säulen im aktiven Bereich am stärksten zur Verbesserung der Stabilität bei. Säulen, die im passiven Bereich und in der Scherzone als Verstärkungswände oder als Block angeordnet sind, sind wirksamer gegenüber Scherversagen als einzelne Säulen.



**Legende**

- 1 passiver Bereich
- 2 Scherzone
- 3 aktiver Bereich

**Bild B.5 — Die axiale Säulenbelastung im aktiven Bereich erhöht den Biege- und Scherwiderstand der Säulen. Im passiven Bereich kann sogar ein Zugversagen der Säulen auftreten**

**B.7.1.3 Überschneidung von Säulen**

Säulen, die mit dem Ziel der Stabilitätserhöhung eingebaut werden, werden meist in einzelnen oder doppelten Reihen entlang und rechtwinklig zu einem Hang, einer Aushubfront oder einem Damm angeordnet. Damit wird ihre Wirksamkeit, verglichen mit Einzelsäulen, erhöht, weil negative Auswirkungen von lokalen Schwäche-zonen in Säulen, ebenso wie das Risiko eines Biegeversagens der Säulen, reduziert werden.

Der Momentenwiderstand der einzelnen Säulenreihen sollte ausreichen, um nicht den Grund für ein Versagen zu bilden. Eine Überschneidung der Säulen in den einzelnen Reihen zur Ausbildung einer Säulenwand erhöht den Momentenwiderstand, und das Kippen kann durch eine Verlängerung der Säulenreihen, und somit der Anzahl der Säulen in einer Reihe, vermieden werden. Wichtig sind die ausreichende Scherfestigkeit des behandelten Bodens im Überschneidungsbereich und eine ausreichende Breite des Überschneidungsbereichs. Wesentlich ist die Beibehaltung der Vertikalität entlang des gesamten Überschneidungsbereichs. Die Scherfestigkeit des stabilisierten Bodens im Überschneidungsbereich bestimmt üblicherweise den seitlichen Widerstand der Säulenreihen.

**B.7.1.4 Säulentrennung**

Ein Bruch kann in der Scherzone aufgrund der Trennung von Säulen innerhalb der Reihe erfolgen, wenn die Gleitfläche nahe dem Kopf der Säulen liegt und der Zugwiderstand innerhalb der Überschneidungszone gering ist. Eine derartige Trennung reduziert den Scherwiderstand der Säulenwand. Es ist zu erwarten, dass der Zugwiderstand des behandelten Bodens in der Überschneidungszone etwa 5 % bis 15 % der einaxialen Druckfestigkeit beträgt (abhängig von der Qualität und der Wirksamkeit der tiefeichenden Bodenstabilisierung kann der Wert darüber oder darunter liegen).

#### B.7.1.5 Dübelswirkung von Säulenreihen

Der Dübelswiderstand der Säulen ist entscheidend, wenn die Gleitfläche nahe der Basis einer Säulenreihe liegt. Sobald die Säulen von den jeweiligen Nachbarsäulen getrennt sind, entspricht der Scherwiderstand je Säule in der Reihe dem Wert für eine Einzelsäule.

#### B.7.1.6 Kippen einer Reihe von auf Spitzendruck belasteten Säulen

Die axiale Belastung von Säulen am Ende einer auf Spitzendruck belasteten Säulenreihe kann sehr hoch werden, wenn die Säulenreihe einer Rotationsbewegung unterworfen ist. Die dabei auftretende maximale axiale Belastung sollte unter der Last liegen, die der einaxialen Druckfestigkeit der Säule entspricht.

#### B.7.1.7 Anwendungen bei tragenden Wänden

Tragende Wände mit Bewehrungsträgern werden üblicherweise nach den Grundsätzen der Gewölbewirkung bemessen.

#### B.7.1.8 Anwendungen in Blockform

Da sich die Eigenschaften von *in situ* behandeltem Boden deutlich von denen des umgebenden unbehandelten Bodens unterscheiden, wird davon ausgegangen, dass der behandelte Boden ein steifes, im Boden eingebautes Konstruktionselement darstellt, das äußere Lasten in eine tragfähige Schicht ableitet (Kitazume et al., 1996), siehe Bild B.6. Zur Vereinfachung wird ein Planungskonzept analog der Bemessung von Schwergewichtskonstruktionen, wie z. B. Betonstützkonstruktionen, angewendet.

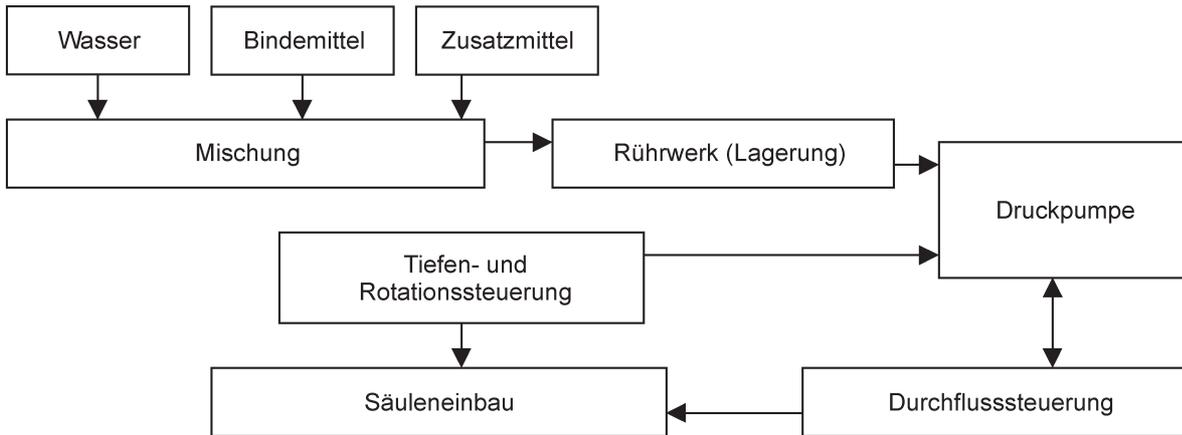
Der erste Bemessungsschritt umfasst eine Stabilitätsanalyse des Überbaus, um sicherzustellen, dass Überbau und behandelter Boden sich als Einheit verhalten.

Der zweite Bemessungsschritt umfasst eine Stabilitätsanalyse des behandelten Bodens auf der Grundlage äußerer Einwirkungen, wobei Grundbruch, Kippen und Tragfähigkeit untersucht werden.

Im dritten Bemessungsschritt wird die innere Stabilität analysiert, indem die durch äußere Kräfte in den behandelten Boden eingebrachten Spannungen analysiert werden und bestätigt wird, dass sie unterhalb der maximal zulässigen Werten liegen. Abschließend wird die Verdrängung des behandelten Bodens betrachtet.

Bei der Planung bezüglich der seismischen Belastung des Überbaus wird in Japan die Analyse der seismischen Intensität angewendet; die zyklischen dynamischen Lasten werden durch Multiplikation der Masse der Konstruktion mit dem seismischen Koeffizienten in eine statische Last umgewandelt.

Im Falle komplexerer Behandlungsraster, die auf dem Zusammenwirken von behandeltem und unbehandeltem Boden zwischen den Säulen beruhen, sollten nach Möglichkeit hoch entwickeltere elastoplastische 2-D- oder 3-D-Analyseverfahren nach der Methode der finiten Elemente herangezogen werden, um die im verbesserten Boden auftretenden Spannungen und Verdrängungen zu analysieren. Selbstverständlich ist die Qualität der Ergebnisse stark von der korrekten Auswahl der Eingangsparameter abhängig.



**Bild B.6 — Ablaufdiagramm des japanischen Planungsschemas für die blockartige Stabilisierung [9]**

## B.7.2 Setzungen

### B.7.2.1 Gesamtsetzungen

Die Planung bezüglich der Verformung von Mixed-in-place-Säulen oder -Elementen oder Konstruktionen, die als Gründung oder Stützwände angewendet werden, muss den Anforderungen der EN 1997-1 entsprechen.

Die behandelten Säulen zur Verringerung der Setzungen von Dämmen werden meist in regelmäßigen Dreiecks- oder Rechtecksrastern angeordnet. Setzungsanalysen basieren üblicherweise auf der Annahme gleicher Spannungszustände, es wird also angenommen, dass über die Gewölbewirkung die Lasten umverteilt werden und somit in einer bestimmten Tiefe die vertikalen Spannungen in den Säulen und im umgebenden Boden gleich werden.

Für eine Säulengruppe wird die mittlere Setzung durch die Aktivierung gegenläufiger Scherspannungen im unbehandelten Boden entlang des äußeren Mantels der Gruppe reduziert. Für die Aktivierung der Scherfestigkeit des Bodens ist nur eine geringe relative Verdrängung (einige mm) erforderlich. Die gegenläufigen Scherspannungen führen zu einer Winkelverdrehung im verbesserten Boden entlang des Mantels der Säulengruppe und damit zu Differenzsetzungen innerhalb der Gruppe. Die gegenläufige Wirkung — und damit die Differenzsetzung — wird mit der Zeit durch die hervorgerufene Konsolidierungssetzung des umgebenden Bodens reduziert. Aus diesem Grund wird sie in der Setzungsanalyse meist vernachlässigt.

### B.7.2.2 Setzungsrate

Beim Trockenmischverfahren können die Säulen aufgrund ihrer möglicherweise höheren Durchlässigkeit gegenüber dem umgebenden Boden den Konsolidierungsprozess ähnlich einem Vertikaldrän beschleunigen. Jedoch ist die Setzungsrate nicht allein vom Drainageeffekt bestimmt. Wenn steifer behandelter Boden und weicher un behandelter bindiger Boden in Kontakt stehen, ist das wesentlichste Phänomen die mit der Zeit stattfindende Spannungsumverteilung im System. Zum Zeitpunkt der Lastaufbringung wird die Last durch Porenwasserüberdrücke getragen. Bedingt durch die schrittweise Steifigkeitszunahme der Säulen erfolgt eine schrittweise Übergabe der Last vom Boden an die Säulen, die zu einer zeitabhängigen Verringerung der vom Boden getragenen Last führt. Als Folge davon nimmt der Porenwasserüberdruck im weichen Boden auch ohne radialen Wasserstrom rasch ab. Diese Spannungsumverteilung ist einer der Hauptgründe für die Setzungsverringerung und die erhöhte Setzungsrate. Daher wird der Konsolidierungsprozess durch das Vorhandensein der Säulen auch dann beschleunigt, wenn die Durchlässigkeit der Säulen auf dem Niveau der Durchlässigkeit des umgebenden Bodens liegt. Somit erhöht die Lastaufteilung zwischen Boden und Säulen den mittleren Koeffizienten der eindimensionalen Konsolidierung. Die Durchlässigkeit der Säulen nimmt mit der Zeit und mit zunehmendem hohen hydrostatischen Druck ab.

Beim Nassmischverfahren liegt die hydraulische Leitfähigkeit der behandelten Säulen im Allgemeinen in derselben Größenordnung wie die des umgebenden unbehandelten Bodens oder ist geringer als diese. Daher wird der Konsolidierungsprozess nur durch den vertikalen, eindimensionalen Wasserstrom bestimmt. Jedoch ist aufgrund der Spannungsumverteilung die Setzungsrate wesentlich höher als die für die eindimensionale Konsolidierung berechnete.

### **B.7.3 Einkapselung**

Eine Einkapselungswand wird durch überschnittene Säulen gebildet, um die Leckage durch die Wand zu verhindern. Die Sicherstellung der Homogenität der Säulen ist, ebenso wie das Verhindern von Leckage durch die Säulenwand, von größter Bedeutung. Bei der Planung muss der Dicke der Wand im Überschneidungsbereich und der Durchlässigkeit der Fugen in diesem Bereich eine ausreichende Toleranz eingeräumt werden. Beim Nassmischverfahren wird häufig Bentonit eingesetzt, um die Durchlässigkeit des behandelten Bodens zu reduzieren.

Wenn das Ziel der tiefreichenden Bodenstabilisierung die Einkapselung von Müllablagerungen oder verunreinigtem Boden ist, wird die Dauerbeständigkeit des behandelten Bodens zu einem der wichtigsten Bemessungsaspekte. Die Reaktion zwischen dem behandelten Boden und der Kontamination sollte untersucht werden, insbesondere wenn der Müll einen hohen Säuregehalt aufweist.

## Anhang C (informativ)

### Verbindlichkeitsgrad der Festlegungen

Die Festlegungen sind nach ihrem Verbindlichkeitsgrad gekennzeichnet:

- RQ: (requirement) Anforderung;
- RC: (recommendation) Empfehlung;
- PE: (permission) Erlaubnis;
- PO: (possibility and eventuality) Möglichkeit und Eventualität;
- ST: (statement) Feststellung.

4.1.1	RQ	7.2.6	RQ	8.6.2.5	RQ
4.1.2	RC	7.2.7	RC	8.6.2.6	RQ
4.1.3	RQ	7.2.8	RQ	8.6.3.1	RQ
4.2.1	RQ	7.3.1	RQ	8.6.3.2	RQ
4.2.2	RQ	7.3.2	RQ	8.6.3.3	RQ
4.2.3	RQ	7.4.1	RQ	8.6.3.4	RQ
5.1.1	RQ	7.4.2	RC	8.6.3.5	ST
5.1.2	RQ	7.4.3	RC	8.6.3.6	ST
5.1.3	RQ	7.4.4	RQ	8.6.3.7	RQ
5.1.4	RQ	7.4.5	RQ	8.7.1	ST
5.1.5	RQ	7.5.1	RC	8.7.2	RQ
5.2.1	RQ	7.5.2	RQ	9.1.1	RC
5.2.2	RQ	7.5.3	RQ	9.1.2	RQ
5.2.3	RC	7.5.4	RQ	9.2.2	RQ
5.2.4	RC	7.5.5	RQ	9.3.1	RQ
6.1.1	ST	8.1.1	RQ	9.3.2	RQ
6.1.2	RQ	8.2.1	RQ	9.3.3	RC
6.1.3	RQ	8.2.2	RQ	9.3.4	RC
6.1.4	RQ	8.2.3	RQ	9.3.5	RC
6.1.5	RQ	8.3.1	RQ	9.3.6	RC
6.1.6	RQ	8.3.2	RQ	9.3.7	RQ
6.2.1	RQ	8.4.1.1	RQ	9.3.8	RQ
6.2.2	ST	8.4.1.2	RQ	9.4.1.1	RQ
7.1.1	RC	8.4.1.3	ST	9.4.1.2	ST
7.1.2	RC	8.5.1	RQ	9.4.1.3	RQ
7.1.3	RQ	8.5.2	RQ	9.4.1.4	RC
7.1.4	PE	8.5.3	RQ	9.4.2.1	RC
7.1.5	RQ	8.6.1.1	ST	9.4.3.1	RQ
7.1.6	RQ	8.6.1.2	RQ	10.1.1	RQ
7.1.7	ST	8.6.1.3	RQ	10.1.2	RQ
7.1.8	ST	8.6.1.4	RQ	10.2.1	RQ
7.2.1	RQ	8.6.1.5	RQ	11.1.1	ST
7.2.2	RC	8.6.2.1	RQ	11.1.2	RQ
7.2.3	RQ	8.6.2.2	RQ	11.2.1	RQ
7.2.4	RC	8.6.2.3	RQ	11.3.1	RC
7.2.5	RQ	8.6.2.4	RQ	11.4.1	RC

## Literaturhinweise

- [1] Baker, S. (2000), *Deformation behaviour of lime/cement column stabilized clay*. Doctoral Thesis, Chalmers Univ. of Technology, Gothenburg
- [2] Broms, B. (1991), Stabilisation of soil with lime columns. In *Foundation Engineering Handbook*, 2nd Edition, van Nostrand Reinhold, New York, Chapter 24, 833–855
- [3] Broms B. (1992), Lime stabilisation. In *Ground Improvement*. (ed. M. P. Moseley), Blackie Academic & Professional, 65–99
- [4] Carlsten, P. (1995), *Lime and lime/cement columns*. SGF Rapport 4:95E
- [5] CDIT (2002), *Deep Mixing Method — Principle, Design and Construction* — Coastal Development Institute of Technology, Japan
- [6] EuroSoilStab (2002). *Development of design and construction methods to stabilise soft organic soils*. Design guide soft soil stabilisation. CT97-0351. Project No. BE-96-3177. European Commission. Industrial & Materials Technologies Programme (Brite-EuRam III). Bruyssel
- [7] Hoikkala, S., Leppänen, M. & Lahtinen, P. (1997). Blockstabilization of peat in road construction. *Proc. 14th ICSMFE*, Hamburg, Vol. 3, pp. 1693–1696
- [8] Kitazume, M., Okane, K. & Miyajima, S. (2000). Centrifuge model tests on failure envelope of column type DMM improved ground. *Soils and Foundations*, Vol. 40, No. 4, 43–55
- [9] Kitazume, M., Omine, K., Miuyake, M. & Fujisawa, H. (1996). Japanese Geotechnical Society Technical Committee Report — Japanese design procedures and recent DMM activities — Grouting and deep mixing. *Proc. 2nd Int. Conf. Ground Improvement Geosystems*, Balkema 2: 925–930
- [10] Kivelö, M. (1998). *Stabilization of embankments on soft soil with lime/cement columns*. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm
- [11] Larsson, S. (2003). *Mixing process for ground improvement by deep mixing*. Doctoral. Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm
- [12] Matsumoto, J., Ohbayashi, J. Harada, K., Tsuboi, H. & Matsui, T. (1998). Application examples of some innovative ground improvement techniques developed in Japan. *Proc. 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Techniques*, pp. 339–346
- [13] Porbaha, A. (2000), State-of-the-art in deep mixing technology — design considerations. *Ground Improvement* 4, 111–125
- [14] Porbaha, A. (2001), Effect of installation on quality of deep mixed soil cement columns. *Proc. of Soil Mixing Seminar at Deep Foundation Institute*, Clayton, Missouri, 95–109.
- [15] Porbaha, A., Tanaka, H. & Kobayashi, M. (1998), State-of-the-art in deep mixing technology, Part 2: Applications. *Ground Improvement* 2, No. 3, 125–139
- [16] Porbaha, A., Shibuya, S. & Kishida, T. (2000), State-of-the-art in deep mixing technology — Geomaterial characterization of deep mixing. *Ground Improvement* 4, No. 3, 91–110
- [17] Porbaha, A., Raybaut, J. L. & Nicholson, P. (2001), State-of-the-art in construction aspects of deep mixing technology. *Ground Improvement* 5, No. 3, 123–140.

## EN 14679:2005 (D)

- [18] Saitoh, S., Suzuki, Y., Nishioka, S. & Okumura, R. (1996). Required strength of cement improved ground. Grouting and Deep Mixing. *Proc. of IS-Tokyo, 2nd Int. Conf. Ground Improvement Geosystems*, Vol 1. pp. 557–562
- [19] Sakai, S., Takano, S. & Ogawa, K. (1996), Consideration on the target strength of deep mixing methods. *Proc. 31st Japan National Conf. on Geot. Engng*, 131–132
- [20] Sarhan, A. & Pampel, A. (1999). Optimierung des Fräs-Misch-Injektionsverfahren (FMI) unter erdstatischen Gesichtspunkten. *Geotechnik* 22, No. 4
- [21] SGF Rapport 2:2000, *Kalk- och kalkcementpelare. Vägledning för projektering, utförande och kontroll (Lime and lime/cement columns. Guidance for projecting, execution and control)*. Swedish Geotechnical Society
- [22] Tanaka, Y., Tsuboi, H., Yamamoto, M. Harada, K. & Matsui, T. (2002). Innovative ground improvement technology in Japan. *Proc. 6th Int. Symp. on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development* (to be published)
- [23] Terashi, M. (1997). Theme lecture : Deep mixing method — Brief state-of-the-art. *Proc. 14<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng, Hamburg*, Vol. 4, pp. 2475–2478
- [24] Terashi, M. (2001), Development of deep mixing in the past quarter century. *Material Science for the 21st Century*, Vol. A, 180–193. The Society of Material Science, Japan
- [25] Terashi, M. & Tanaka, H. (1981), Ground improvement by deep mixing method. *Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng*, Vol. 3, 777–780
- [26] Terashi, M. (2001), Development of deep mixing in the past quarter century. *Material Science for the 21st century*, Vol. A, 180–193. The Society of Material Science, Japan
- [27] US Department of Transportation (2000), *An Introduction to the Deep Soil Mixing Methods as used in Geotechnical Applications*. Publication No. FHWA–RD–99–138, Federal Highway Administration
- [28] Wildner, H., Kleist, F. & Strobl, Th. (1999). Das Mixed-in-Place-Verfahren für permanente Dichtungswände im Wasserbau. *Wasserwirtschaft* 89, No. 5
- [29] EN ISO 9000, *Quality management systems — Fundamentals and vocabulary (ISO 9000:2000)*