

DIN EN 15237

DIN

ICS 93.020

**Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) –
Vertikaldräns;
Deutsche Fassung EN 15237:2007**

Execution of special geotechnical works –
Vertical drainage;
German version EN 15237:2007

Exécution des travaux géotechniques spéciaux –
Drains verticaux;
Version allemande EN 15237:2007

Gesamtumfang 61 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 15237:2007) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 288 „Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau)“, WG 11 ohne deutsche Mitarbeit erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR (Frankreich) gehalten wird.

Auf nationaler Ebene ist der Arbeitsausschuss NA 005-05-08 AA „Injektionen, Düsenstrahlverfahren, tiefreichende Bodenstabilisierung“ im Normenausschuss Bauwesen (NABau) des DIN Deutsches Institut für Normung e. V. zuständig.

Deutsche Fassung

**Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten
(Spezialtiefbau) —
Vertikaldräns**

Execution of special geotechnical works —
Vertical drainage

Exécution des travaux géotechniques spéciaux —
Drains verticaux

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 7. Januar 2007 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 des CEN 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, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, 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 Erforderliche Informationen für die Ausführung der Arbeit	8
5 Geotechnische Untersuchungen	9
5.1 Allgemeines	9
5.2 Besondere Anforderungen	10
6 Materialien und Produkte	10
6.1 Allgemeines	10
6.2 Rohstoffe von vorgefertigten Dräns	10
6.3 Streifendräng	11
6.4 Vorgefertigter zylindrischer Drän.....	14
6.5 Sanddräng	16
7 Überlegungen zur Bemessung	16
7.1 Feldversuche.....	16
8 Ausführung	17
8.1 Verfahrensdarstellung.....	17
8.2 Vorbereitung der Baustelle	17
8.3 Dräneinbau	18
8.4 Besondere Aspekte	18
9 Bauaufsicht und Überwachung	19
9.1 Bauaufsicht	19
9.2 Überwachung	19
10 Aufzeichnungen	20
10.1 Während der Konstruktion zu führende Aufzeichnungen.....	20
10.2 Aufzeichnungen bei Fertigstellung der Arbeit.....	20
11 Besondere Anforderungen	20
11.1 Allgemeines	20
11.2 Sicherheit.....	20
11.3 Umweltschutz.....	21
11.4 Auswirkungen auf benachbarte Bauwerke	21
Anhang A (informativ) Praktische Aspekte der vertikalen Dränung	22
Anhang B (informativ) Aspekte der Bemessung	43
Anhang C (informativ) Verbindlichkeitsgrad der Spezifikationen	54
Literaturhinweise	56

Bilder

Bild A.1 — Fließdiagramm zur Ausführung der vertikalen Dränung	23
Bild A.2 — Zeichnung zur Darstellung vollständig durchdringender Dräns (Dräns im Kontakt mit Dränschichten im oberen und unteren Bereich), einer oberen Dränebene und einer Auflast....	24
Bild A.3 — Beispiele für Streifendräns.....	25
Bild A.4 — Beispiel eines Dränschuhs für einen Streifendrän	26
Bild A.5 — Ausknicken und Kräuseln des Dräns durch sehr starke relative Kompression von Torf.....	27
Bild A.6 — Prüfgeräte zur Bestimmung der Durchflusskapazität [(Bild A.6 a)) Prüfeinrichtung Nr. 1 und (Bild A.6 b)) Prüfeinrichtung Nr. 2 nach EN ISO 12958].....	29
Bild A.7 — Über die Dauer der Prüfung der Durchflusskapazität beobachtete Auswirkungen des Kriechens auf die Durchflusskapazität [6].....	30
Bild A.8 — Beispiel einer Prüfeinrichtung zur Prüfung der Durchflusskapazität eines ausgeknickten Dräns [12].....	32
Bild A.9 — Ergebnisse von im Labormaßstab ausgeführten Prüfungen der Durchflusskapazität für verschiedene Streifendräns. Dräns von Boden umschlossen [19], [24], [26].....	33
Bild A.10 — Einfluss einer zeitabhängigen Verschlechterung des Filterzustandes auf die Durchflusskapazität [29]. Die Anzahl der Tage, die die Dräns nach dem Einbau im Boden verblieben, ist an jeder Kurve angegeben. Durchgezogene Linien stellen Dräns dar, die in Torf eingebaut wurden, gestrichelte Linien in Gytija eingebaute Dräns.....	34
Bild A.11 — Korngrößengrenzen bei körnigem Material, das bei Sanddräns zum Einsatz kommt.....	36
Bild A.12 — Beispiel einer oberen Dränebene aus körnigem Material mit unzureichender Durchlässigkeit, in dem Wasser gefangen wird, was zu einem Rückstau im Drän führt	38
Bild A.13 — Skizze des Vakuumverfahrens und dessen Auswirkungen auf den Porenwasserdruck sowohl für den horizontalen Porenwasserfluss in Richtung der Dräns (a)) als auch für den vertikalen Porenwasserfluss zwischen den Dräns (b))	39
Bild A.14 — Einbau eines horizontalen zylindrischen Dräns (links) und dessen Verbindung mit den Vertikaldräns	40
Bild A.15 — Typische Messgeräte zur Überwachung der Wirksamkeit der Vertikaldränung (einfacher Fall)	41
Bild A.16 — Typische Messgeräte zur Überwachung der Wirksamkeit der Vertikaldränung (Baustelle mit verschiedenen Schichten)	42
Bild B.1 — Diagramm des Bemessungsprozesses, einschließlich der Labor- und Felduntersuchungen, der funktionalen Bemessung und der Feldversuche.....	44
Bild B.2 — Durch einen Drän entwässerter Bodenzylinder	47
Bild B.3 — Beispiel für den Einfluss des Brunnenwiderstandes auf den Konsolidationsgrad bei teilweise durchdringenden und durchdringenden Dräns, die bis zu einer Tiefe von 30 m bzw. 60 m eingebaut wurden.....	50
Bild B.4 — Anforderungen an die Durchflusskapazität q_w in Bezug auf den Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens bei einer Verlängerung der Konsolidationszeit um 10 % bei einer Dräneinbautiefe l (siehe Bilder B.2 und B.3)	51
Bild B.5 — Verzögerung bei der Konsolidation in einer Tiefe/des Dräneinbaus (siehe Bilder B.2 und B.3) bei Dräns mit einer Durchflusskapazität von $500 \text{ m}^3/\text{a}$ ($16 \text{ cm}^3/\text{s}$)	52

Tabellen

Tabelle 1 — Empfohlene Prüfhäufigkeit zur Kontrolle der Herstellung.....	14
Tabelle A.1 — Kriechbeiwerte (Werte für den Fall, dass keine früheren Daten vorliegen).....	31
Tabelle A.2 — Durchflusskapazität q_w und q_{wb} (in m^3/a) für verschiedene statische Drücke (in kPa) und ein hydraulisches Gefälle $i = 0,1$	32
Tabelle B.1 — Beispiele der Mindestdurchflusskapazitäten nach Analyse der Konsolidation	51

Vorwort

Dieses Dokument (EN 15237:2007) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 288 „Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau)“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom AFNOR gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis August 2007, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis August 2007 zurückgezogen werden.

Dieses Dokument wurde in Ergänzung zu EN 1997-1, *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik — Teil 1: Allgemeine Regeln* und zu EN 1997-2, *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik — Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds* erarbeitet. In der vorliegenden Norm wird das Thema der Bemessung nur so weit behandelt, wie dies erforderlich ist; die Anforderungen an Konstruktion und Bauaufsicht werden jedoch ausführlich abgedeckt.

Dieses Dokument wurde durch eine Arbeitsgruppe von Delegierten aus 10 europäischen Ländern erarbeitet. Fachleute aus Japan nahmen ebenfalls an den Zusammenkünften der Arbeitsgruppe teil und trugen so zur Formulierung des Schlussentwurfs bei. Die Arbeitsgruppe nahm ihre Arbeit im März 2002 auf.

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

1 Anwendungsbereich

Diese Europäische Norm legt die allgemeinen Grundsätze für die Ausführung, Prüfung, Bauaufsicht und Überwachung von Projekten für Vertikaldräns fest.

Diese Europäische Norm umfasst die Anwendung vorgefertigter Vertikaldräns und Sanddräns und behandelt Anforderungen an Bemessung, Dränmaterialien sowie an Einbauverfahren. Diese Europäische Norm ist auf die Verbesserung schwach durchlässiger, stark komprimierbarer Böden durch Vertikaldränung und Vorbelastung anwendbar. Informationen bezüglich der Belastung (Damm, Vakuum oder Grundwasserabsenkung) und der Vorbelastung sind in den informativen Anhängen A und B angegeben.

Die Vertikaldränung wird sowohl bei Bauwerken an Land als auch bei Meeres- bzw. Seebauwerken angewendet, wobei folgende Zwecke verfolgt werden:

- (Vor-)Konsolidierung und Verringerung von Setzungen nach dem Errichten des Bauwerkes;
- Beschleunigen des Konsolidationsprozesses durch Verringerung der Pfadlängen für den Porenwasserabfluss;
- Erhöhung der Standsicherheit/Stabilität (durch Erhöhung der wirksamen Spannungen im Boden);
- Grundwasserabsenkung;
- Abschwächen von Verflüssigungswirkungen.

In jedem Fall findet eine Gesamtbehandlung des Bodens statt (das Volumen der Dräns ist im Verhältnis zum behandelten Bodenvolumen gering).

Diese Europäische Norm behandelt nicht die Verbesserung des Bodens mit Hilfe von Brunnen, Kies- und Steinsäulen, geotextilumschlossenen Säulen mit großem Durchmesser oder Bewehrungselementen.

Die Vertikaldränung kann auch mit weiteren Gründungs- oder Bodenverbesserungsverfahren, wie z. B. Elektro-Osmose, Pfähle und verdichtete Sandpfähle, Fallplattenverdichtung und tiefreichende Bodenstabilisierung, kombiniert werden.

Eine Anleitung zu praktischen Aspekten der Vertikaldränung, z. B. zur Untersuchung der Dräneigenschaften, zu den Ausführungsverfahren und der Ausrüstung, ist in Anhang A enthalten. Die Untersuchung der Bodeneigenschaften und die Beurteilung der Bemessungsparameter, die durch die Dräneigenschaften und die Ausführung beeinflusst werden, sind in Anhang B angegeben.

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

EN 1997-2, *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik — Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds*

EN 13252:2000, *Geotextilien und geotextilverwandte Produkte — Geforderte Eigenschaften für die Anwendung in Dränanlagen*

EN ISO 9862, *Geokunststoffe — Probenahme und Vorbereitung der Messproben (ISO 9862:2005)*

EN ISO 10319, *Geotextilien — Zugversuch am breiten Streifen (ISO 10319:1993)*

EN ISO 10320, *Geotextilien und geotextilverwandte Produkte — Identifikation auf der Baustelle (ISO 10320:1999)*

EN ISO 10321, *Geotextilien — Zugversuch am breiten Streifen an Verbindungen/Nähten (ISO 10321:1992)*

EN ISO 11058, *Geotextilien und geotextilverwandte Produkte — Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit normal zur Ebene, ohne Auflast (ISO 11058:1999)*

EN ISO 12956, *Geotextilien und geotextilverwandte Produkte — Bestimmung der charakteristischen Öffnungsweite (ISO 12956:1999)*

EN ISO 12958:1999, *Geotextilien und geotextilverwandte Produkte — Bestimmung des Wasserableitvermögens in der Ebene (ISO 12958:1999)*

EN ISO 14688 (alle Teile), *Geotechnische Erkundung und Untersuchung*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

3.1

Schneckeneinbauverfahren

(en: auger installation method)

(fr: installation à la tarière)

Einbauverfahren von Sanddräns mit Hilfe eines Schneckenbohrers oder einer durchgehenden Hohlbohrschnecke

3.2

Streifendrän¹⁾

(en: band drain)

(fr: drain plat)

vorgefertigter Drän mit rechteckigem Querschnitt, üblicherweise bestehend aus einem zentralen Kern mit Röhrensystem, umgeben von einem Filtermantel

3.3

zylindrischer Drän

(en: cylindrical prefabricated drain)

(fr: drain tubulaire)

Drän, bestehend aus einem ringförmig gewellten und perforierten offenen Kern, umgeben von einem Filterschlauch

3.4

Durchflusskapazität

q_w

(en: discharge capacity)

(fr: capacité de décharge)

die Durchflusskapazität eines Drainagebrunnens entspricht der Querschnittsfläche des Dräns, multipliziert mit dessen Gesamtdurchlässigkeit in Längsrichtung (das Volumen an Wasser, das bei einem hydraulischen Gefälle von Eins je Zeiteinheit aus dem Drän fließt)

1) Als weitere Begriffe werden hier „Dochtdräns“ und „vorgefertigter Vertikaldrän“ (PVD, en: prefabricated vertical drains) verwendet.

3.5**Verdrängungseinbauverfahren****(en: displacement installation method)****(fr: installation par fonçage refoulant)**

Einbauverfahren von Dräns mit Hilfe eines stirnseitig geschlossenen Stahlrohres/Stahlaufsatzrohrs

3.6**Dränschuh****(en: drain anchor)****(fr: sabot d'ancrage)**

Anker, der vor dem Einbau am Ende von Streifendräns befestigt wird und der sowohl ein Eindringen von Boden in den Dorn während des Einbaus als auch ein Hinaufziehen des Streifendräns aus dem Boden bei der Entnahme des Dorns verhindert

3.7**obere Dränebene****(en: drainage blanket)****(fr: tapis drainant)**

obere stark durchlässige Dränschicht, die sich mit den Dräns in engem Kontakt befindet und das Entstehen eines Rückstaus in den Dräns verhindert

3.8**dynamische Dräeinbauweise****(en: dynamic installation method)****(fr: méthode d'installation par battage ou vibrofonçage)**

Dräeinbauverfahren unter Anwendung dynamischer Einwirkungen (Schlag- oder Vibrationshammer)

3.9**geotextilumschlossener Sanddrän****(en: geotextile enclosed sand drain)****(fr: drains de sable dans une gaine de géotextile)**

mit einer Art Filtergewebe aus Geotextil umschlossener Sanddrän

3.10**Einbau mittels Hochdruckinjektion****(en: jet installation method)****(fr: méthode d'installation par lancement)**

Einbauverfahren von Sanddräns mit Hilfe von Innen-Spülbohren oder Rotary-Spülbohren

3.11**Sanddrän****(en: sand drain)****(fr: drain de sable)**

Drän mit kreisförmigem Querschnitt aus körnigem, stark durchlässigem Material (Sand, Kies)

3.12**statisches Einbauverfahren****(en: static installation method)****(fr: méthode d'installation par fonçage)**

Dräeinbauverfahren mit Hilfe einer statischen Last (Vorpressen)

3.13**Vibrationseinbauverfahren****(en: vibro installation method)****(fr: méthode d'installation par vibrofonçage)**

Einbauverfahren von Sanddräns mit Hilfe eines auf einem Hohldorn montierten Höhenrüttlers oder eines Tiefenrüttlers

3.14

Arbeitsebene

(en: working platform)

(fr: plateforme de travail)

Plattform, die für die Dräeinbaumaschinen eine Zugangsmöglichkeit zu den Vertikaldräns schafft

4 Erforderliche Informationen für die Ausführung der Arbeit

4.1 Vor Ausführung der Arbeit müssen alle erforderlichen Informationen bereitstehen.

4.2 Diese Angaben müssen Folgendes umfassen:

- a) relevante Informationen bezüglich der Bedingungen an der Baustelle;
- b) die Anordnung der Hauptrasterlinien für das Abstecken des Geländes;
- c) Zeichnungen mit der Lage und Länge der Dräns;
- d) alle rechtlichen oder gesetzlichen Einschränkungen;
- e) Verfahrensdarstellung zum Einbau von Vertikaldräns (siehe 8.1);
- f) Merkmale der Dräns (physikalische und hydraulische Merkmale), Begleitdokumentation zur CE-Kennzeichnung;
- g) Spezifikation zu den Dräns sowie zu anderen zu verwendenden Materialien (siehe Abschnitt 6) und Plan mit sämtlichen Prüfungen und Annahmeverfahren in Bezug auf die bei den Arbeiten eingesetzten Materialien;
- h) Beschreibung eines geeigneten Qualitätssicherungssystems, einschließlich Bauaufsicht und Überwachung.

4.3 Die Angaben hinsichtlich der Bedingungen an der Baustelle müssen, sofern zutreffend, Folgendes umfassen:

- a) Geometrie der Baustelle (Randbedingungen, Topographie, Zugangsbedingungen, Böschungen und Beschränkungen hinsichtlich der Bauhöhe usw.);
- b) Eigenschaften des Bodens auf der Baustelle, die die Ausführung der Vertikaldränung beeinflussen könnten:
 - Beschreibung des Bodens (Bodenart, Bodenschichtung sowie Vorliegen und Häufigkeit von Sand- und Schluffschichten sowie harten Schichten);
 - Durchdringwiderstand (z. B. Ergebnisse von Durchdringprüfungen);
 - Zusammensetzung, seitliche Ausdehnung, Dicke und Festigkeit der Oberflächenschicht, Wurzeln von Bäumen, Schüttungen usw.);
 - Vorhandensein von Blockkies und Felsblöcken sowie verfestigten Schichten, die Schwierigkeiten bei der Ausführung der Arbeit verursachen oder eine besondere Einbauausrüstung erfordern können.
- c) folgende Angaben zum Klima und zur Umwelt:
 - Angaben zu den Wetterbedingungen in Gebieten mit extremen Klimabedingungen;
 - marine Bedingungen (Strömungen, Gezeitenbedingungen, Wellenbedingungen usw.);
 - Umweltgefährdungen (jegliche Kontaminationen des Wassers und des Untergrunds, die die Ausführung, die Sicherheit bei der Arbeit oder die Abförderung des Aushubmaterials von der Baustelle beeinträchtigen könnten, einschließlich des Vorhandenseins gefährlicher Gase und von Blindgängern, sind zu dokumentieren).

- d) bestehende unterirdische Bauwerke, Versorgungsleitungen, bekannte Kontaminationen und archäologisch bedingte Beschränkungen;
- e) umweltbezogene Beschränkungen, einschließlich Lärm, Vibration, Verunreinigung;
- f) geplante oder laufende Baumaßnahmen wie beispielsweise Entwässerung, Tunnelbau, Tiefbaggern;
- g) zuvor in der Nähe der Baustelle mit dem Einbau von Dräns gemachte Erfahrungen;
- h) die Eigenschaften der Arbeitsebene und der Dränschicht (physikalische und hydraulische Merkmale);
- i) die Bedingungen im Hinblick auf Bauwerke, Straßen, Versorgungsleitungen usw. in der Nähe der Baustelle.

4.4 Für die Ausführung des Belastungsvorganges müssen die folgenden Angaben bereitstehen:

- a) Bauablaufplan für den Belastungsvorgang;
- b) Vorbelastung (temporäre und ständige Belastung);
- c) Zeitablaufplan für den Belastungsvorgang und die mögliche Vorbelastung;
- d) für die Vorbelastung verwendete Masse der Schüttung pro Volumeneinheit;
- e) Angabe sämtlicher Beschränkungen, z. B. bei der Bemessung erforderliche Phaseneinteilung der Konstruktion;
- f) Überwachungsprogramm.

4.5 Darüber hinaus sind folgende Anweisungen zu geben:

- a) Verfahrensweise zur Berichterstattung bei unvorhergesehenen Umständen oder für den Fall, dass sich herausstellt, dass die Bedingungen von den bei der Bemessung zugrunde gelegten abweichen;
- b) Verfahrensweise zur Berichterstattung für den Fall, dass bei der Bemessung die Beobachtungsmethode zur Anwendung kommt.

4.6 Jegliche zusätzlichen oder abweichenden Anforderungen, die in den Geltungsbereich der auf die Genehmigungen bezogenen Abschnitte dieser Europäischen Norm fallen, sind vor Beginn der Arbeiten festzulegen und zu vereinbaren.

5 Geotechnische Untersuchungen

5.1 Allgemeines

5.1.1 Die geotechnischen, für die Bemessung von Arbeiten am Vertikaldrän nach den Anforderungen von EN 1997 durchgeführten Untersuchungen müssen Angaben für den Einbau von Vertikaldräns bereitstellen, siehe 4.3 b).

5.1.2 Der Bericht zur geotechnischen Untersuchung muss rechtzeitig zur Verfügung stehen, so dass die Planung und Ausführung der Arbeiten am Vertikaldrän sichergestellt ist.

5.1.3 Erweisen sich die durchgeführten geotechnischen Untersuchungen als unzureichend, sollte eine weitere Untersuchung durchgeführt werden.

5.2 Besondere Anforderungen

5.2.1 Zusätzlich zur allgemeinen geologischen Beschreibung und den in EN 1997-1 aufgeführten Einzelheiten muss der Bericht zur Standortuntersuchung Angaben zu den Bodenbedingungen in Bezug auf den Einbau der Vertikaldräns und die Belastung umfassen, siehe Anhänge A und B.

5.2.2 Angaben zu den Bodenbedingungen müssen Folgendes umfassen:

- a) piezometrische Höhe des Grundwasserspiegels sowie dessen Schwankungen und mögliche Abweichung von den Bedingungen in Bezug auf den hydrostatischen Druck;
- b) undrainede Scherfestigkeit.

5.2.3 Die Geländeoberkante sowie die Lage aller Untersuchungs- oder Prüfstandorte sollten in Bezug auf den auf nationaler Ebene anerkannten Bezugshorizont oder einen feststehenden Bezugspunkt festgelegt werden.

6 Materialien und Produkte

6.1 Allgemeines

6.1.1 Bei der Vertikaldränung kommen vorgefertigte Dräns und/oder Sanddräns zum Einsatz.

ANMERKUNG Auf dem Markt wird eine Vielzahl von vorgefertigten Dräns angeboten. Die meisten davon bestehen aus dem Kern und einem Geotextilfilter.

6.1.2 Vorgefertigte Dräns, die aus einem Kern und einem Geotextilfilter bestehen, unterliegen der CE-Kennzeichnung. Folgende spezifische Eigenschaften müssen angegeben werden:

- a) Zugfestigkeit, in kN nach EN ISO 10319;
- b) Dehnung bei der maximalen Zugkraft, in % nach EN ISO 10319;
- c) Zugfestigkeit des Filters, in kN/m nach EN ISO 10319;
- d) Zugfestigkeit der Nähte und Verbindungen, in kN/m nach EN ISO 10321;
- e) Geschwindigkeitsindex des Filters (v_{h50}), in mm/s nach EN ISO 11058;
- f) charakteristische Maschenweite des Filters (O_{90}), in μm nach EN ISO 12956;
- g) Durchflusskapazität des Dräns, in m^3/Jahr nach EN ISO 12958 (siehe auch Anhang A);
- h) Beständigkeit, in Jahren (EN 13252:2000, Anhang B).

ANMERKUNG Das in EN 13252 erwähnte Durchschlagverhalten (Kegelfallversuch, EN 918) ist für diese Anwendung nicht zwingend vorgeschrieben.

6.2 Rohstoffe von vorgefertigten Dräns

6.2.1 Ein vorgefertigter Drän besteht in der Regel aus einem Geotextil oder einem geotextilverwandten Produkt.

6.2.2 Das Produkt kommt bei Anwendungen zum Einsatz, die keine Bewehrung des Bodens einschließen und bei denen die Langzeitfestigkeit keinen wesentlichen Parameter darstellt, sowie in natürlichen Böden mit einem pH-Wert zwischen 4 und 9 und bei einer Bodentemperatur von weniger als 25 °C nach EN 13252. Es gilt eine Funktionsdauer von bis zu 5 Jahren.

6.2.3 Bei der Herstellung der Dränkerne ist die Verwendung von 5 % internem Wiedergewinnungsmaterial (z. B. Rohstoffe aus unverbrauchten Dränkernen) zulässig. Die Zusammensetzung sollte bekannt sein, und das Material sollte auf dieselbe Weise verarbeitet werden wie das Ausgangsprodukt. Die Verwendung von Rückgewinnungsmaterial ist nur zulässig, wenn nachgewiesen werden kann, dass dieses nicht zu einer Verunreinigung des Bodens oder des Grundwassers führt.

6.2.4 Die bei der Herstellung der Dräns verwendeten Materialien dürfen nicht zu einer Verunreinigung des Bodens oder des Grundwassers führen.

6.2.5 Biologisch abbaubare Dräns können verwendet werden, wenn sie über die gesamte Projektlebensdauer die Anforderungen an die Dränung erfüllen.

6.3 Streifendräns

6.3.1 Form und Aufbau von Streifendräns

6.3.1.1 Ein Streifendrän ist ein vorgefertigter Drän mit rechteckigem Querschnitt, üblicherweise bestehend aus einem zentralen Kern mit Röhrensystem, umgeben von einem Filter. Die Breite des Kerns von Streifendräns beträgt üblicherweise 100 mm, die Dicke liegt zwischen 2 mm und 10 mm.

6.3.1.2 Der Kern sollte aus einem profilierten Streifen (mit oder ohne Perforation) oder einer profilierten Matte mit offenem oder geschlossenem Gefüge bestehen. Durch das Gefüge sollte ein regelmäßiges Wasserableitvermögen sichergestellt sein.

6.3.1.3 Risse und/oder sonstige Mängel sind nicht zulässig. Als Teil der Qualitätslenkung der Herstellung ist eine regelmäßige Sichtprüfung auf Schäden vorzunehmen.

6.3.2 Messungen

6.3.2.1 Die Ballenlänge, Breite und Dicke des Kerns sollte an allen Stellen den vom Hersteller angegebenen Maßen entsprechen (wobei die vom Hersteller angegebenen zulässigen Abweichungen gelten). Siehe Begleitdokumentation zur CE-Kennzeichnung (EN 13252).

6.3.2.2 Die Messungen sollten EN ISO 9863-1 entsprechen.

6.3.3 Beständigkeit

6.3.3.1 Die Beständigkeit des Dräns muss den Anforderungen an die Beständigkeit nach EN 13252 entsprechen (Bewitterung, geforderte Funktionsdauer von bis zu 5 Jahren oder länger, wenn die Dräns eingebaut werden, um eine Verflüssigung des Bodens abzuschwächen).

6.3.3.2 Während der Lagerung auf der Baustelle sollten die Dräns gegen Bewitterung geschützt werden.

6.3.3.3 Sofern das Produkt nicht verpackt oder in einem Gebäude gelagert wird, darf es nicht länger als vom Hersteller in der CE-Kennzeichnung (EN 13252) angegeben offen gelagert werden. Die Empfehlungen des Lieferanten sind zu befolgen.

6.3.4 Zugfestigkeit und Dehnung

6.3.4.1 Die erforderliche Zugfestigkeit des Streifendräns ist in hohem Maße vom Typ der beim Einbau angewendeten Maschinen, vom Einbauverfahren und von der Einbautiefe des Dräns abhängig. Die Zugfestigkeit der Streifendräns in Längsrichtung muss ausreichend hoch sein, um ein Brechen während des Einbaus und danach zu verhindern.

6.3.4.2 Die Prüfung der Zugfestigkeit und der Dehnung des Streifendräns sollte nach EN ISO 10319 erfolgen (wobei die entsprechenden Abänderungen bezüglich der Breite des Produkts vorzunehmen sind).

6.3.4.3 Folgende Eigenschaften eines Streifendröns werden empfohlen:

- a) Dehnung ≥ 2 % im Moment des Versagens des schwächsten Elementes;
- b) Dehnung ≤ 10 % bei einer Zugkraft von 0,5 kN (bei Frost 20 %);
- c) Mindestzugfestigkeit $> 1,5$ kN im Moment des Versagens des schwächsten Elementes. Während der Prüfung sollte die Naht nicht versagen.

ANMERKUNG Diese Werte sind von der Einbauausrüstung und dem Einbauverfahren abhängig und dürfen möglicherweise entsprechend angeglichen werden.

6.3.4.4 Die Festigkeit der Naht, gemessen nach EN ISO 10321 bei einer Reihe von Temperaturen, wie sie auf der Baustelle vorkommen können, muss mindestens 1 kN/m betragen.

6.3.5 Durchflussskapazität

6.3.5.1 Die Durchflussskapazität und die Filtrationsmerkmale stellen die wichtigsten Eigenschaften dar. Die Durchflussskapazität wird durch folgende Faktoren beeinflusst:

- a) aufgrund des während des Konsolidationsprozesses zunehmenden wirksamen Seitendrucks wird das Filter in das Röhrensystem des Kerns gepresst, wodurch sich die Röhrenfläche verringert;
- b) die während des Konsolidationsprozesses erfolgende vertikale Kompression des Bodens kann zu einem Ausknicken der relativ gering komprimierbaren Streifendröns führen, wodurch sich die Röhrenfläche verringern kann;
- c) durch das Filter können Feinstoffe in den Kern gelangen und das Röhrensystem blockieren;
- d) die Bodentemperatur hat Einfluss auf die Druckbeständigkeit und die Kriecheigenschaften der Dröns und damit auf die Durchflussskapazität.

6.3.5.2 Die erforderliche Durchflussskapazität des Streifendröns ist in großem Maße abhängig vom Zweck der Bodenverbesserung, von den Konsolidationsparametern des Bodens, dem Abstand zwischen den Dröns und der Einbautiefe des Dröns (siehe Anhang B).

6.3.5.3 Die Durchflussskapazität muss ausreichend hoch sein, um die Anforderungen an die Bemessung zu erfüllen.

6.3.5.4 Der empfohlene Wert der Durchflussskapazität ist in Anhang B angegeben.

6.3.5.5 Die Prüfung der Durchflussskapazität sollte mit den in Anhang A unter A.4.1.2 angegebenen Abänderungen entsprechend EN 12958 durchgeführt werden.

6.3.5.6 Für übliche Anwendungen sollte die Prüfung der Durchflussskapazität bei Labortemperatur durchgeführt werden, und der Prüfbericht sollte sich auf eine Temperatur von 20 °C beziehen. Bei Anwendungen in tropischen Umgebungen sollte die Prüfung der Durchflussskapazität bei einer Temperatur durchgeführt werden, die der Temperatur des Bodens am Ort des Dröneinbaus entspricht, und der Prüfbericht sollte auf die jeweilige Temperatur bezogen sein.

6.3.5.7 Die Prüfdauer sollte ausreichend lang sein, um einen konstanten Wert für die Durchflussskapazität zu erreichen, vorzugsweise mindestens 2 Tage unter dem vom Planer festgelegten maximalen statischen Druck.

6.3.6 Filter von Streifendröns

6.3.6.1 Der Filtermantel sollte aus einem Vliesmaterial bestehen, das aus Fasern besteht, die mechanisch, chemisch oder thermisch miteinander verbunden sind.

6.3.6.2 Der Filtermantel sollte eine regelmäßige Struktur aufweisen.

6.3.6.3 Falten, Risse, Löcher und/oder sonstige Mängel sind nicht zulässig. Die Nähte des Filtermantels sind so zu gestalten, dass keine Feinstoffe in den Kern des Streifendrängs eindringen können.

6.3.6.4 Während der Herstellung sind regelmäßig und in Übereinstimmung mit dem Ablaufplan zur werkseitigen Produktionskontrolle Sichtprüfungen auf Schäden vorzunehmen.

6.3.7 Zugfestigkeit je Breitereinheit des Filters

6.3.7.1 Die Zugfestigkeit des Filters muss ausreichen, um ein Brechen während des Einbaus und danach zu verhindern.

6.3.7.2 Die Prüfung sollte nach EN ISO 10319 durchgeführt werden. Der Mittelwert der einzelnen Messwerte für die Zugfestigkeit in Längsrichtung sollte nicht weniger als 3 kN/m betragen. Für Einbauten in größerer Tiefe als 25 m oder unter schwierigen Bodenbedingungen wird eine Mindestzugfestigkeit von 6 kN/m in Längsrichtung empfohlen.

6.3.8 Geschwindigkeitsindex des Filters

Die Prüfung sollte nach EN ISO 11058 durchgeführt werden. Der Mittelwert der einzelnen Messwerte für den Geschwindigkeitsindex (v_{h50}) sollte mehr als 1 mm/s betragen. Erfolgt der Dräneinbau aufgrund von verflüssigungsbezogenen Problemen, sollte die Porengröße des Filters entsprechend angepasst werden, um eine für diese Anwendung angemessene Durchlässigkeit des Filters sicherzustellen, siehe 6.4.

6.3.9 Porengröße des Filters

6.3.9.1 Die Porengröße des Filters ist so zu wählen, dass eine ausreichende Durchflusskapazität sichergestellt ist und ein bedeutender Verlust der Durchflusskapazität durch Zusetzen des Filters und/des Kerns durch Bodenteilchen vermieden wird. Die Nähte des Filters dürfen keine Maschenweite aufweisen, die über der des Geotextilfilters liegt.

6.3.9.2 Vorwiegend sind die Anforderungen an die Merkmale des Filtermantels unter Berücksichtigung der Eigenschaften des Bodens auf der Baustelle und der Einbaubedingungen (Trocken- oder Feuchtgebiete, küstennaher Bereich) in dem Projekt anzugeben.

6.3.9.3 Der nach EN ISO 12956 gemessene Wert der charakteristischen Maschenweite O_{90} sollte nicht mehr als 80 μm betragen.

ANMERKUNG Der Wert von O_{90} ist möglicherweise von projektspezifischen Anforderungen beeinflusst, und höhere Werte können zulässig sein.

6.3.9.4 Bei schluffigen Böden und Schluff sollte die charakteristische Maschenweite O_{90} des Filters entsprechend den folgenden Kriterien an die Bodenbedingungen angepasst werden:

- a) $< d_{85, \text{soil}}$ bei schluffigen Böden, die in Hinblick auf das Filterverfahren problematisch sind;
- b) $< 1,5d_{50, \text{soil}}$ bis $2,8d_{50, \text{soil}}$ bei Böden, die in Hinblick auf das Filterverfahren schwierig sind, überwiegend Mittel- und Grobschluff.

6.3.10 Qualitätslenkung

6.3.10.1 Streifendrängs müssen allen in Europa geltenden Anforderungen und Verfahren der Konformitätsbewertung entsprechen, die auf sie zutreffen. Die Eigenschaften müssen innerhalb der in den durch eine notifizierte Stelle zugelassenen Begleitdokumenten angegebenen Grenzen liegen.

6.3.10.2 Die Merkmale der Filter und der Dräns sowie die entsprechenden Prüfverfahren und die Prüfhäufigkeit sind in Tabelle 1 angegeben, die in Anlehnung an EN 13252 erstellt wurde. Das Probenahmeverfahren für die unterschiedlichen Prüfverfahren muss EN ISO 9862 entsprechen.

ANMERKUNG Die Prüfhäufigkeit auf der Baustelle sollte zwischen den beteiligten Parteien vereinbart werden.

Tabelle 1 — Empfohlene Prüfhäufigkeit zur Kontrolle der Herstellung

Eigenschaft	Empfohlene Prüfhäufigkeit	Geforderte Norm
Filter:		
Dicke	25 000 m ²	EN 9863-1
Flächenbezogene Masse	25 000 m ²	EN 9864
Porengröße	200 000 m ²	EN 12956
Geschwindigkeitsindex	200 000 m ²	EN 11058
Zugfestigkeit in Längsrichtung	200 000 m ²	EN 10319
Zugfestigkeit in Querrichtung	200 000 m ²	EN 10319
Geoverbundstoff:		
Breite und Dicke	25 000 m	EN 9863-1
Längenbezogene Masse	25 000 m	EN 9864
Zugfestigkeit in Längsrichtung	100 000 m	EN 10319
Dehnung bei maximaler Zugkraft	100 000 m	EN 10319
Durchflusskapazität, gerade	500 000 m	Anhang A
Durchflusskapazität, ausgeknickt	500 000 m	Anhang A
Zugfestigkeit der Filternaht	100 000 m	EN 10321
Beständigkeit	500 000 m	EN 13252

6.4 Vorgefertigter zylindrischer Drän

6.4.1 Form und Struktur zylindrischer Dräns

6.4.1.1 Ein zylindrischer Drän besteht aus einem ringförmig gewellten und perforierten offenen Kern, umgeben von einem Filterschlauch. Der Außendurchmesser des Dräns beträgt üblicherweise 50 mm und der Innendurchmesser 45 mm.

6.4.1.2 Risse und/oder sonstige Mängel sind nicht zulässig. Als Teil der Qualitätslenkung der Herstellung ist eine regelmäßige Sichtprüfung auf Schäden vorzunehmen.

6.4.2 Messungen

Der Durchmesser und die Dicke des Kerns sollten den vom Hersteller angegebenen Maßen entsprechen (wobei die vom Hersteller angegebenen zulässigen Abweichungen gelten).

6.4.3 Beständigkeit

6.4.3.1 Die Beständigkeit des Dräns muss den Anforderungen an die Beständigkeit nach EN 13252 (Anhang B, B.1, Bewitterung, und B.2, geforderte Funktionsdauer von bis zu 5 Jahren oder mehr, wenn die Dräns eingebaut werden, um eine Verflüssigung des Bodens abzuschwächen) entsprechen.

6.4.3.2 Während der Lagerung auf der Baustelle sollten die Dräns gegen Bewitterung geschützt werden.

6.4.3.3 Sofern das Produkt nicht verpackt oder in einem Gebäude gelagert wird, darf es nicht länger als vom Hersteller in der CE-Kennzeichnung (EN 13252) angegeben offen gelagert werden. Die Empfehlungen des Lieferanten sind zu befolgen.

6.4.4 Zugfestigkeit und Dehnung

6.4.4.1 Die erforderliche Zugfestigkeit des zylindrischen Dräns ist in hohem Maße vom Typ der beim Einbau angewendeten Maschinen, von der Einbauverfahrensweise und der Einbautiefe des Dräns abhängig. Die Zugfestigkeit der Dräns in Längsrichtung muss ausreichend hoch sein, um ein Brechen während des Einbaus und danach zu verhindern.

6.4.4.2 Die Prüfung der Zugfestigkeit und der Dehnung des zylindrischen Dräns sollte in Übereinstimmung mit dem genormten Zugversuch mit entsprechend abgeänderten Spannbacken erfolgen.

6.4.4.3 Die Festigkeit der Naht, gemessen nach EN ISO 10321 bei einer Reihe von Temperaturen, wie sie auf der Baustelle vorkommen, muss mindestens 1 kN/m betragen.

6.4.5 Durchflusskapazität und Filtrationsmerkmale

6.4.5.1 Die Durchflusskapazität der zylindrischen Dräns ist im Allgemeinen viel höher als sie für die Bodenkonsolidation gefordert wird. Sie darf sinken, wenn der zylindrische Kern aufgrund des während des Konsolidationsprozesses zunehmenden wirksamen Seitendrucks und/oder durch Ausknicken gedrückt wird.

6.4.5.2 Der durch den Filtermantel ausgeübte Druck darf nicht dazu führen, dass die Perforation des Rohres (Kerns) verschlossen wird.

6.4.5.3 Rohre und Filter von für die Abschwächung der Verflüssigung verwendeten Dräns müssen über die gesamte Bemessungslebensdauer den Auswirkungen der Alterung standhalten.

6.4.6 Filter von zylindrischen Dräns

6.4.6.1 Der Filtermantel sollte aus Fasern bestehen, die mechanisch, chemisch oder thermisch miteinander verbunden sind.

6.4.6.2 Der Filtermantel sollte eine regelmäßige Struktur aufweisen.

6.4.6.3 Falten, Risse, Löcher und/oder sonstige Mängel sind nicht zulässig. Die Nähte des Filtermantels sind so zu gestalten, dass keine Feinstoffe in den Kern des Streifendräns eindringen können.

6.4.6.4 Während der Herstellung sind regelmäßig und in Übereinstimmung mit dem Ablaufplan zur werkseigenen Produktionskontrolle Sichtprüfungen auf Schäden vorzunehmen.

6.4.7 Zugfestigkeit je Breiteneinheit des Filters

6.4.7.1 Die Zugfestigkeit des Filters muss ausreichen, um ein Brechen während des Einbaus und danach zu verhindern.

6.4.7.2 Die Prüfung sollte nach EN ISO 10319 durchgeführt werden. Der Mittelwert der einzelnen Messwerte für die Zugfestigkeit in Längsrichtung sollte nicht weniger als 3 kN/m betragen. Für Einbauten in größerer Tiefe als 25 m oder unter schwierigen Bodenbedingungen wird eine Mindestzugfestigkeit von 6 kN/m in Längsrichtung empfohlen und muss mit dem empfohlenen Wert übereinstimmen.

6.4.8 Geschwindigkeitsindex des Filters

Die Prüfung sollte nach EN ISO 11058 durchgeführt werden. Der Mittelwert der einzelnen Messwerte für den Geschwindigkeitsindex (v_{h50}) sollte mehr als 1 mm/s betragen. Der Mittelwert der einzelnen Messwerte muss dem empfohlenen Wert entsprechen. Erfolgt der Dräneinbau aufgrund von verflüssigungsbezogenen Problemen, sollte die Porengröße des Filters entsprechend angepasst werden, um eine für diese Anwendung angemessene Durchlässigkeit des Filters sicherzustellen.

6.4.9 Porengröße des Filters

Die Anforderungen sind mit denen von 6.3.9 identisch.

6.4.10 Qualitätslenkung

Das vorgefertigte Dränprodukt muss allen in Europa geltenden Anforderungen und Verfahren der Konformitätsbewertung entsprechen, die auf das Produkt zutreffen. Die Eigenschaften müssen innerhalb der in den durch eine notifizierte Stelle zugelassenen Begleitdokumenten angegebenen Grenzen liegen.

6.5 Sanddräns

6.5.1 Der Sanddrän weist einen kreisförmigen Querschnitt auf und besteht aus körnigem, stark durchlässigem Material. Der Durchmesser eines Sanddräns schwankt üblicherweise zwischen 150 mm und 500 mm.

6.5.2 Die Korngrößenverteilung des für Sanddräns verwendeten Materials sollte vorzugsweise innerhalb der Grenzen nach Anhang A liegen.

6.5.3 Die Durchlässigkeit des Sandes sollte ausreichend hoch sein, um bedeutenden Brunnenwiderstand zu verhindern. Die Anforderungen an die Durchlässigkeit sind von der Durchlässigkeit des umgebenden Bodens und der Tiefe des Dräneinbaus abhängig (siehe Anhang B) und sollten in erster Linie durch den Planer definiert werden.

6.5.4 Das für Sanddräns verwendete Material darf beim Einbau nicht zu Verunreinigungen des Bodens oder des Grundwassers führen.

7 Überlegungen zur Bemessung

7.1 Feldversuche

7.1.1 Prüfgebiete mit unterschiedlichen Abständen zwischen den Dräns und/oder unterschiedlichen Dräntypen können als Grundlage der abschließenden Bemessung des Dräneinbaus erforderlich sein.

7.1.2 Der Konsolidationsprozess in den Prüfgebieten sollte durch Messung der Setzung in Verbindung mit der Messung des Porenwasserdrucks, vorzugsweise mit Hilfe von in unterschiedlicher Tiefe angeordneten Setzungsmessgeräten und Piezometern, überwacht werden. Die Erhöhung der Festigkeit infolge der Konsolidation kann möglicherweise durch Laborprüfungen und/oder durch *In-situ*-Prüfungen beurteilt werden.

7.1.3 Sofern zutreffend, kann die horizontale Verdrängung am Umfang des Prüfgebietes mit Hilfe von Neigungsmessgeräten gemessen werden.

7.1.4 Bei Prüfgebieten mit teilweise durchdringenden Dräns sollte der Einfluss auf den Konsolidationsprozess der unterliegenden unbehandelten Bodenschichten berücksichtigt werden.

8 Ausführung

8.1 Verfahrensdarstellung

8.1.1 Es ist eine Verfahrensdarstellung zu erarbeiten, die die Arbeit beim Einbau des Vertikaldräns ausführlich beschreibt. Diese Verfahrensdarstellung muss ausführliche Informationen zu Lage, Dränraster, Ausrüstung und Einbauverfahren sowie zu möglichen Einschränkungen während der Bauphase und jeglichen mit der Ausführung der Arbeit verbundenen Gefährdungen enthalten.

8.1.2 Die vom Auftragnehmer gewählte Ausrüstung und das Einbauverfahren müssen beurteilt und genehmigt werden.

8.1.3 Folgende Verfahrensdarstellung muss bereitgestellt werden, die mindestens folgende Informationen enthält (siehe Abschnitt 4):

- a) Ziel und Umfang des Dräeinbaus;
- b) Einbauort und Arbeitsbereiche;
- c) Anlage und Ausrüstung;
- d) Kontrollverfahren;
- e) Verfahren hinsichtlich möglicher Unterbrechungen des Dräeinbaus und/oder der Belastung;
- f) Nachweisprüfverfahren;
- g) Arbeitsunterlagen (Aufbau, Zeichnungen, Berichte);
- h) Maßnahmen zur Vermeidung des Durchstoßens von artesisch gespanntem Grundwasser;
- i) Beurteilung der sicherheits- und umweltbezogenen Risiken.

8.1.4 Sofern dies als erforderlich angesehen wird, sollten Probeeinbauten vorgenommen werden, um die Eignung der zum Einbau eingesetzten Maschine für die Bedingungen an der Baustelle und das verwendete Dränmaterial zu bestätigen.

8.2 Vorbereitung der Baustelle

8.2.1 Die Vorbereitung ist in Übereinstimmung mit den Konstruktionsvorschriften und den jeweils an der Baustelle vorherrschenden Bedingungen auszuführen. Dies muss die entsprechenden Zugangsmöglichkeiten für Anlagen und Maschinen, die Nivellierung der Arbeitsebene, die Herstellung einer für die Ausrüstung angemessenen Tragfähigkeit des Bodens sowie den Einbau einer oberen Dränebene einschließen. Bei Bauwerken an Land kann die obere Dränebene möglicherweise nach dem Einbau der Vertikaldräns eingebaut werden.

8.2.2 Alle an die Baustelle gelieferten Materialien und Produkte für die Vertikaldränung sind zu identifizieren und gegen die Material- und Produktspezifikationen zu prüfen.

8.2.3 Dient die obere Dränebene als Arbeitsebene und ist direkt an der Bodenoberfläche installiert, so sollte sie eine Mindestdicke von 0,5 m und eine anfänglich horizontale Oberfläche aufweisen. Ist die Dränschicht auf der Oberseite der Arbeitsebene eingebaut und besteht aus üblichem Schüttungsmaterial, beträgt die Mindestdicke der Arbeitsebene bei Bauwerken an Land üblicherweise 0,5 m. Die obere Dränebene ist dann mindestens 0,3 m dick. Sie sollte aus Kiessand oder sandigem Kies bestehen und weniger als 5 % an Material mit einer Korngröße < 0,06 mm enthalten. Sie sollte gegen das Eindringen von feinkörnigem Material und gegen Frost geschützt sein, da dadurch ihre Durchlässigkeit beeinträchtigt werden könnte. Sie kann auch aus einer geeigneten Dränanlage aus Geotextilien und geotextilverwandten Produkten bestehen.

8.2.4 Besteht die obere Dränebene aus einer Schicht von körnigem Material, sollten Anweisungen hinsichtlich der Verfahren und der Häufigkeit der Prüfung der Korngrößenverteilung sowie der Durchlässigkeit des Materials der oberen Dränebene gegeben werden.

8.2.5 Die obere Dränebene sollte vor Frost geschützt werden, um sicherzustellen, dass ihre Durchlässigkeit nicht bedeutend verringert wird.

8.2.6 Im Falle des Dräneinbaus bei Meeresbauwerken sollte die obere Dränebene aus körnigem Material bestehen, vorzugsweise aus sandigem Kies mit einer Mindestdicke von 0,5 m. Die obere Dränebene sollte vor dem Dräneinbau aufgebracht werden.

8.3 Dräneinbau

8.3.1 Die Oberflächenlage des Einbauortes muss bei allen Dräns um weniger als 0,15 m von der festgelegten Lage abweichen. Die Vertikalität des Hauptdräns darf nicht weniger als 50 (vertikal):1 (horizontal) betragen, es sei denn, dies wird durch Hindernisse unmöglich gemacht.

8.3.2 Ist es aufgrund von Hindernissen unmöglich, einen Drän einzubauen, ist der nächste Drän so nahe wie möglich einzubauen.

8.3.3 Erschwert das Vorhandensein einer Schüttung oder dichter Böden den Einbau der Dräns mit herkömmlichen Verfahren, sollten harte Schichten vor dem Einbau des Dräns durch Vorbohrung oder andere angemessene Verfahren durchdrungen werden.

8.3.4 Die Dräns sind (mit einer zulässigen Abweichung von 0,15 m) bis in die bei der Bemessung festgelegte Tiefe einzubauen. Bei weichen Bodenschichten unterschiedlicher Dicke darf diese Tiefe als die Tiefe der unterliegenden festeren Bodenschicht definiert werden.

8.3.5 Für jeden eingebauten Drän sind Angaben zum Datum und der Tiefe des Einbaus bereitzustellen.

8.3.6 Während des Einbaus von Sanddräns ist die Menge des in die Dräns eingefüllten Sandes zu überwachen, um zu prüfen, ob es zu Abschnürungen oder zum Versagen der Dräns kommt.

8.3.7 Beim Einbau von Streifendräns sollte der Dorn einen freien Innenraum für den Drän bieten und sollte so ausgelegt sein, dass Bodenstörungen auf ein Mindestmaß verringert werden. Weitere Informationen sind in Anhang A enthalten.

8.3.8 Die Einbauanlage für Streifendräns sollte vorzugsweise mit einem vollautomatischen Aufzeichnungsgerät ausgestattet sein. Folgende Parameter sollten aufgezeichnet werden:

- a) Kennnummer des Dräns;
- b) Datum und Zeit;
- c) Einbautiefe;
- d) akkumulierte eingebaute Dränlänge;
- e) Vertikalität und Lage.

8.3.9 Das Zusammenfügen von Dräns ist zulässig, solange dadurch der Dränweg nicht behindert wird und die Zugfestigkeit der Stöße den Anforderungen nach 6.3.4 und 6.3.7 entspricht.

8.4 Besondere Aspekte

8.4.1 Das Einbauverfahren von Dräns sollte nicht die Stabilität der Baustelle gefährden. Insbesondere sollte auf den Porenwasserüberdruck geachtet werden, der sich durch dynamische Einbauweisen während des Einbauprozesses und durch Verdrängungseinbauverfahren in empfindlichem Ton (Quickton) aufbaut.

8.4.2 Der Einbau von Sanddräns muss durch Personal erfolgen, das zuvor Erfahrungen mit Einbauverfahren gesammelt hat (Einbau mit stirnseitig geschlossener Verrohrung, Einbau mit stirnseitig geöffnetem Dorn, Einbau mittels Hochdruckinjektion usw.).

8.4.3 Vor dem Einbau von Streifendräns in den Boden sind diese Dräns mit einem Dränschuh zu versehen, der den Drän in dessen Position hält, wenn der Dorn aus dem Boden herausgezogen wird. Der Boden sollte daran gehindert werden, dass er während des Einbaus in den Dorn gelangt (stirnseitig geschlossener Dorn) (siehe Anhang A).

8.4.4 Nach dem Herausziehen des Dorns sind die Streifendräns so zuzuschneiden, dass sie sich mit der oberen Dränebene in angemessenem hydraulischem Kontakt befinden, vorzugsweise 0,2 m bis 0,25 m oberhalb der Oberfläche der Arbeitsebene.

8.4.5 Vollständig durchdringende Dräns, die mit einer darunterliegenden stark durchlässigen Schicht verbunden sind, müssen ausreichend weit in die tiefere stark durchlässige Schicht vordringen, sodass sichergestellt ist, dass sich die Dräns mit dieser Schicht in angemessenem hydraulischem Kontakt befinden.

9 Bauaufsicht und Überwachung

9.1 Bauaufsicht

9.1.1 Um zu überprüfen, ob das Bauwerk der Bemessung und den weiteren Vertragsunterlagen entspricht, muss angemessen ausgebildetes Personal, das über Erfahrungen mit der Verfahrensweise verfügt, mit der Bauaufsicht der Arbeiten betraut werden.

9.1.2 Treten unvorhergesehene Bedingungen auf oder werden neue Informationen zu den Bodenbedingungen verfügbar, sind die für die Bemessung verantwortlichen Personen sofort entsprechend zu informieren.

9.1.3 Die jeweiligen Verfahren für Nachweis, Kontrolle und Annahme sind vor Beginn der Arbeit festzulegen.

9.1.4 Die tatsächliche Häufigkeit der Kontrollen und das dafür angewendete Verfahren sollten angegeben werden.

9.1.5 Die Identifizierung muss bei vorgefertigten Dräns nach EN ISO 10320 oder nach ähnlichen Verfahrensweisen bei Dräns mit speziellen Merkmalen auf der Baustelle zu erfolgen.

9.2 Überwachung

9.2.1 Der Umfang und die Verfahren zur Überwachung sind entsprechend der Bemessung festzulegen.

9.2.2 Beim Umfang des Überwachungssystems sollte die Art der Belastung (z. B. schrittweise Belastung, Vakuum, Grundwasserabsenkung), die Auswahl des Dräntyps und frühere Erfahrungen mit Ergebnissen, die unter vergleichbaren Boden- und Belastungsbedingungen sowie mit vergleichbaren Dräntypen erreicht wurden, berücksichtigt werden.

9.2.3 Während der Ausführung der Arbeit sind der Konstruktionsprozess zu kontrollieren und alle Informationen zu den Bodenbedingungen sowie den zulässigen Abweichungen bei der Konstruktion zu überwachen.

9.2.4 Der Konsolidationsprozess ist mit Hilfe von angemessenen Beobachtungen der Setzung zu überwachen. Die endgültige Primärkonsolidationssetzung lässt sich mit guter Genauigkeit aus den zeitbezogenen Beobachtungen der Setzungen abschätzen (siehe Anhang A).

9.2.5 Der Konsolidationsprozess sollte auch durch angemessene Beobachtungsverfahren des Porenwasserdrucks nachgewiesen werden, besonders bei Problemen mit der Stabilität oder wenn die Beobachtungsmethode zur Bemessung angewendet wird.

9.2.6 Sofern zutreffend, müssen seitlich zeitbezogene Bewegungen entlang der Außengrenzen des belasteten Bereiches überwacht werden. Es sind geeignete Verfahren anzuwenden, um diese Bewegungen zu beurteilen, z. B. durch Neigungsmessgeräte.

9.2.7 Die Häufigkeit der Beobachtung der Setzungen und des Porenwasserdrucks sollten so angepasst werden, dass eine realistische Auslegung des Konsolidationsprozesses möglich wird.

9.2.8 Die zur Überwachung eingesetzten Geräte sollten frühzeitig eingebracht werden, sodass schon vor Beginn des Belastungsvorganges stabile Bezugswerte vorliegen.

9.2.9 Sofern zutreffend, sollte der Anstieg der Festigkeit des Bodens mit Hilfe von Laborprüfungen an Probekörpern und/oder *In-situ*-Prüfungen bestätigt werden.

10 Aufzeichnungen

10.1 Während der Konstruktion zu führende Aufzeichnungen

Es sind Aufzeichnungen zu den in den Abschnitten 8 und 9 aufgeführten relevanten Aspekten des Dräneinbaus, der Prüfungen und Beobachtungen zu führen, die an der Baustelle bereitliegen müssen.

10.2 Aufzeichnungen bei Fertigstellung der Arbeit

Es sind Aufzeichnungen zur Konstruktion im Bauzustand zu führen, die Folgendes umfassen müssen:

- a) Aufzeichnungen nach 10.1;
- b) ausführliche Angaben zum fertig gestellten Dräneinbau, einschließlich der Prüfergebnisse, sowie zu jeglichen Abweichungen von den Planzeichnungen und Spezifikationen;
- c) Einzelheiten zu den verwendeten Materialien und Produkten;
- d) Einzelheiten zu den relevanten geotechnischen Bodenbedingungen.

11 Besondere Anforderungen

11.1 Allgemeines

11.1.1 In diesem Abschnitt werden nur die Aspekte der baustellenbezogenen Sicherheit und des Umweltschutzes betrachtet, die speziell für die vertikale Dränung gelten.

11.1.2 Alle relevanten Europäischen und nationalen Normen, Spezifikationen und gesetzlichen Anforderungen zu Sicherheit und Umweltschutz während der Ausführung der Arbeit sind zu beachten.

11.1.3 Der Einbau von Dräns darf bestehende unterirdische öffentliche Leitungen nicht beschädigen.

11.2 Sicherheit

11.2.1 Die Einbauausrüstung muss hinsichtlich der Konstruktion und Standsicherheit den Europäischen und/oder nationalen Sicherheitsregeln entsprechen. Der Ausrüstung zum Einbau sind Dokumente zu Betrieb, Wartung und Sicherheit beizufügen. Die Arbeiter müssen in Übereinstimmung mit nationalen Sicherheitsvorschriften zum Umgang mit Kranen und hohen Anlagen ausgebildet sein.

11.2.2 Die Anlage für den Dräeinbau sollte mit einem Überrollbügel ausgestattet sein, um die Kabine für den Fall eines durch eine örtlich unzureichenden Tragfähigkeit der Arbeitsebene verursachten Umkippens der Maschine zu schützen.

11.2.3 Die Tragfähigkeit der Arbeitsebene muss ausreichend sein, um die Last der Einbauanlage zu tragen.

11.2.4 Um nachzuweisen, dass die Tragfähigkeit der Arbeitsebene ausreicht, um die Last der Einbauanlage zu tragen, sollte die gesamte Fläche mit einem vollständig beladenen Schaufellader oder Kipper geprüft werden, sodass Schwachstellen der Arbeitsebene festgestellt werden.

11.2.5 Für den Fall, dass zwei oder mehr Einbauanlagen während des Einbaus von Dräns auf der gleichen Arbeitsebene arbeiten, sollte der horizontale Abstand zwischen den Einbauanlagen größer sein als die Gesamthöhe der Anlagen.

11.2.6 Für den Fall, dass der Dräeinbau in der Nähe von Starkstromleitungen oder unterirdischen öffentlichen Leitungen erfolgt, sollten zutreffende Sicherheitsmaßnahmen beachtet werden.

11.3 Umweltschutz

11.3.1 Bei der Konstruktion sind umweltbezogene Beschränkungen wie Lärm, Schwingungen, Verunreinigung des Wassers und Auswirkungen auf benachbarte Bauwerke zu identifizieren und zu berücksichtigen.

11.3.2 Wird kontaminiertes Grundwasser im Verlauf des Konsolidationsprozesses durch die Dräns aus dem Boden herausgedrückt, muss es aufbereitet werden.

11.3.3 An bestimmten Standorten kann der Einbau von Dräns möglicherweise eine Verbindung zwischen den Grundwasserleitern herbeiführen, was sich nachteilig auf die Umwelt auswirken kann. Dies sollte beurteilt werden, worauf erforderlichenfalls die Bemessung zu ändern ist.

11.4 Auswirkungen auf benachbarte Bauwerke

Sofern sich in der Nähe der Baustelle bzw. im möglichen Einflussbereich der Arbeiten empfindliche Bauwerke oder instabile Böschungen befinden, sollten diese vor und während der Arbeiten sorgfältig auf ihren Zustand hin beobachtet werden, und es sollte die entsprechende Dokumentation vorgenommen werden.

Anhang A (informativ)

Praktische Aspekte der vertikalen Dränung

A.1 Einleitung

In Fällen, in denen die externe Belastung von schwach durchlässigen Böden, wie z. B. Ton, Gytja²⁾, zersetzter Torf usw., eine Spannungserhöhung verursacht, die über den Vorkonsolidationsdruck des Bodens hinausgeht, entsteht Porenwasserüberdruck, gefolgt von einem Konsolidationsprozess, in dessen Verlauf Porenwasser aus dem Boden herausgedrückt wird. Die dadurch verursachte Volumenabnahme des Bodens wird von einer schrittweisen Zunahme der wirksamen Spannung sowie einer entsprechenden Abnahme des Porenwasserüberdrucks begleitet. Der Konsolidationsprozess setzt sich fort, bis der Porenwasserüberdruck vollständig ausgeglichen ist und die Last durch wirksame Spannungen getragen wird, ein Prozess, dessen Dauer von den Konsolidationsmerkmalen des Bodens und den Dränwegen abhängt (je länger der Dränweg, umso länger der Konsolidationsprozess). Das Ziel des Einbaus von Vertikaldräns besteht darin, die Dränwege und damit die Zeit zu verkürzen, bis der durch den Belastungsvorgang entstandene Porenwasserüberdruck ausgeglichen ist. Die Zeit bis zum Ausgleich des Porenwasserüberdrucks (die Konsolidationszeit) wird umso kürzer sein, je geringer der Abstand zwischen den Dräns ist.

A.2 Anwendungsgebiete

Wie unter A.1 erwähnt, dient der Einbau von Vertikaldräns als Hilfsmittel dafür, durch Belastung verursachte lang andauernde Konsolidationssetzungen zu verkürzen. Ein weiteres Ziel besteht darin, durch eine Erhöhung der Gesamtscherfestigkeit die Stabilität zu verbessern. In Erdbebengebieten kann die vertikale Dränung auch dafür eingesetzt werden, Verflüssigungsphänomene abzuschwächen.

Beispiele für Gebiete, in denen diese Verfahrensweise im Allgemeinen bereits Anwendung gefunden hat, sind:

- Straßen- und Eisenbahndämme;
- Konstruktion und Bewehrung von Deichen;
- Dämme für Baustellen, auf denen Wohnhäuser, Industriegelände, Bahnhöfe usw. entstehen sollen;
- Vorbelastung von Deponien;
- Seebauwerke und Anwendungen in Küstennähe;
- Landgewinnung, Häfen und Flughäfen.

Vertikaldräns wurden auch bereits zur elektro-osmotischen Entwässerung angewendet. Dabei werden Elektroden in die vorgefertigten Streifendräns eingeführt und an ein Spannungsgefälle [5] und [27] angeschlossen. Die auf diese Weise erreichte Konsolidationsgeschwindigkeit wird durch das Spannungsgefälle und den elektro-osmotischen Durchlässigkeitsbeiwert beeinflusst.

Zunehmende Anwendung finden Vertikaldräns auf dem Gebiet des Umweltschutzes bei der Sanierung von kontaminiertem Boden. Das durch die Dräns herausgepresste, kontaminierte Wasser muss möglicherweise vor der Entsorgung aufbereitet werden.

2) Zersetzte Pflanzen- und Tierrückstände; diese Bodenart kann anorganische Bestandteile enthalten (EN ISO 14688-1).

Die geforderte Funktionsdauer von Vertikaldräns ist üblicherweise auf ein Maximum von etwa 5 Jahren begrenzt. Eine Ausnahme bilden zur Abschwächung der Verflüssigung eingesetzte Dräns, bei denen die Funktionsdauer wesentlich länger sein muss.

A.3 Ausführung der vertikalen Dränung

Die funktionalen Anforderungen des Projekts stellen die Grundlage der geotechnischen Bemessung der vertikalen Dränung dar. Die Ausführung des Einbaus einer vertikalen Dränanlage ist in Bild A.1 dargestellt. Sie umfasst die Errichtung einer Arbeitsebene, die Herstellung einer oberen Dränebene, die Festlegung des Dränrasters und den Einbau der Dräns, gefolgt vom Belastungsvorgang und der Überwachung.

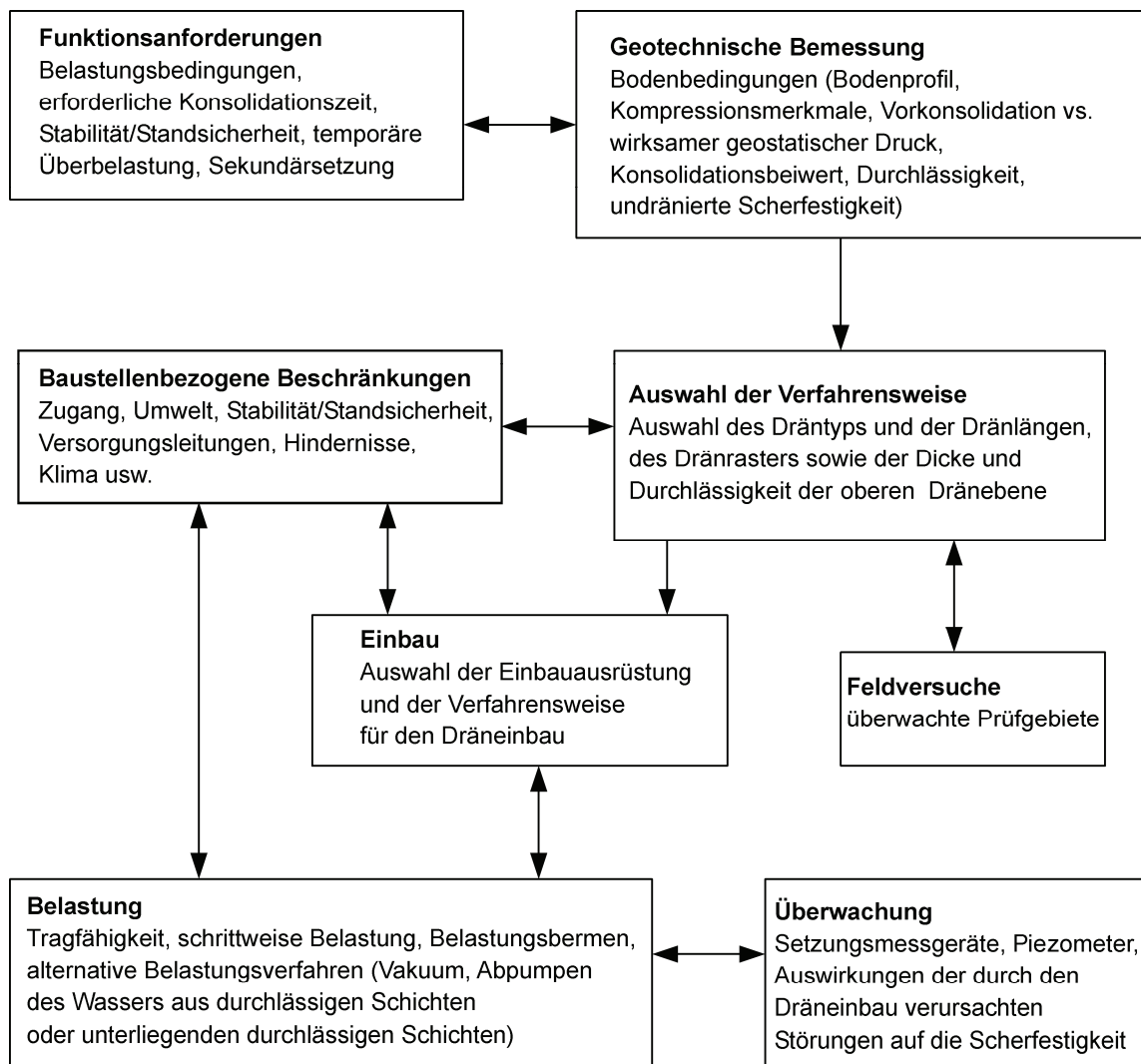
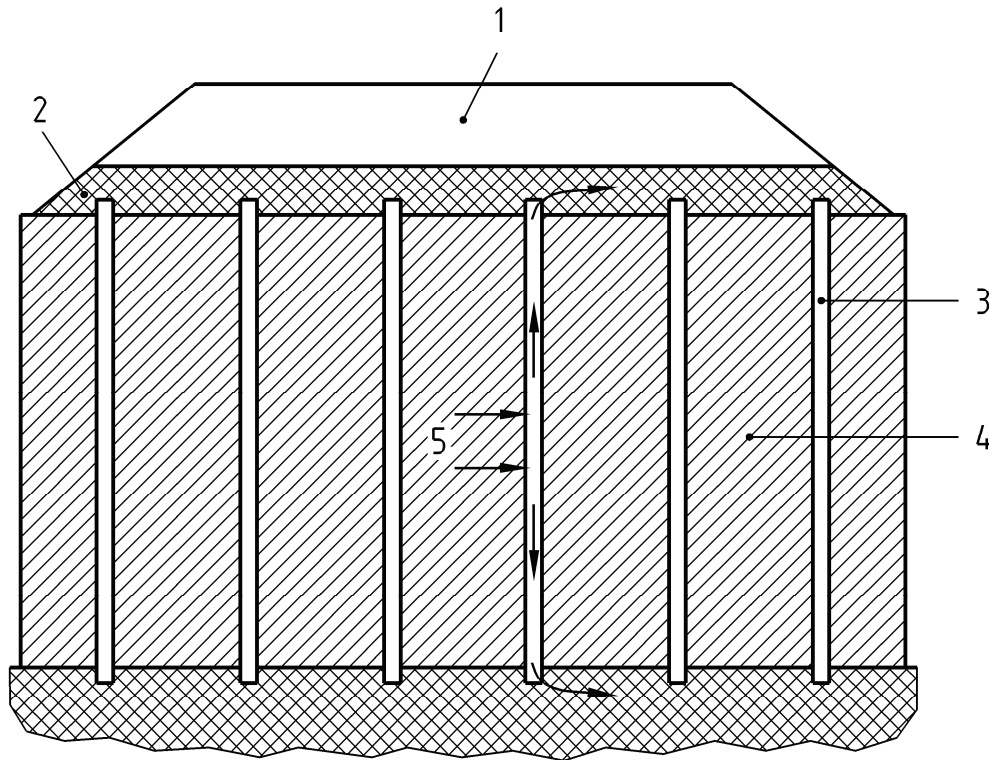


Bild A.1 — Fließdiagramm zur Ausführung der vertikalen Dränung

Vorgefertigte Dräntypen haben schrittweise die zuvor häufig angewendeten Sanddräns ersetzt. Der Einbau von Vertikaldräns kann die ursprünglichen Eigenschaften des Bodens beeinträchtigen (z. B. Verringerung der Scherfestigkeit und des Konsolidationsbeiwertes). Eine mögliche Verringerung der Scherfestigkeit ist in Fällen zu berücksichtigen, in denen die Stabilität/Standicherheit unter den Bedingungen einer Belastung gefährdet sein kann. Die vertikale Dränung und die Vorbelastung sind in Bild A.2 dargestellt. Durch den Überdruck des Porenwassers, der durch Belastung entsteht, wird Porenwasser aus dem Boden herausgepresst, zuerst in horizontaler Richtung gegen die Dräns und anschließend vertikal durch die Dräns. Darüber hinaus wird eine im Allgemeinen geringere Menge an Wasser in vertikaler Richtung zwischen den Dräns aus dem Boden herausgepresst (Beitrag durch die eindimensionale Konsolidation).



Legende

- 1 Auflast
- 2 obere Dränebene
- 3 Vertikaldräns
- 4 Tonschicht
- 5 Porenwasser

Bild A.2 — Zeichnung zur Darstellung vollständig durchdringender Dräns (Dräns im Kontakt mit Dränschichten im oberen und unteren Bereich), einer oberen Dränebene und einer Auflast

In Abhängigkeit von dem verwendeten Einbauverfahren und der Vorgehensweise kann der Einbau der Vertikaldräns die ursprünglichen Eigenschaften des Bodens beeinträchtigen (z. B. Verringerung der Scherfestigkeit und des Konsolidationsbeiwertes). Das sollte bei der Bemessung berücksichtigt werden.

A.4 Dräntypen

A.4.1 Streifendrängs

A.4.1.1 Allgemeines

Vorgefertigte Streifendrängs bestehen üblicherweise aus einem zentralen Kern, der von einem Filtermantel umgeben ist, siehe Bild A.3. Die Breite von Streifendrängs beträgt üblicherweise 100 mm.

A.4.1.2 Arten von Drängs



a) kanalformiger Kern mit angeklebtem Filter



b) kanalformiger Kern mit umhüllendem Filter



c) Geomatte mit stirnseitig gedichtetem Filter



d) spitzbogenförmiger Kern mit umhüllendem Filter

Bild A.3 — Beispiele für Streifendrängs

A.4.1.3 Einbauverfahren

Streifendrängs werden in einem Hohlhorn mit rechteckigem, rhombischem oder kreisförmigen Querschnitt eingebaut. Die Größe des Horns wird üblicherweise so gewählt, dass während des Einbaus in seinem Inneren ein Freiraum für den Streifendräng verbleibt. Darüber hinaus muss die Biegesteifigkeit des Horns ausreichend hoch sein, um die Vertikalität des eingebauten Drängs sicherzustellen.

Ein Drängschuh, der vor dem Einbau an der Spitze des Drängs befestigt wird, verhindert, dass der Dräng bei der Entnahme des Horns nach oben gezogen wird, siehe Bild A.4. Während des Einbaus sollte verhindert werden, dass Boden zwischen der Innenseite des Horns und dem Dräng eindringt. Anderenfalls wird der Dräng beim Herausziehen hohen Zugkräften ausgesetzt. Die Form des Horns und des Drängschuhs müssen so aufeinander abgestimmt werden, dass ein Eindringen von Boden in den Horn verhindert wird.

Das Einbringen des Horns in den Boden erfolgt entweder durch eine statische Last oder durch eine dynamische Einwirkung, mit Hilfe eines Vibrations- oder Schlaghammers. In Böden, die empfindlich gegenüber Störungen sind, ist der statische Einbau zu bevorzugen.

Nach dem Herausziehen des Horns sind die Streifendrängs so zuzuschneiden, dass sie sich mit der oberen Drängenebene in engem Kontakt befinden, vorzugsweise etwa 25 cm oberhalb der Arbeitsebene.

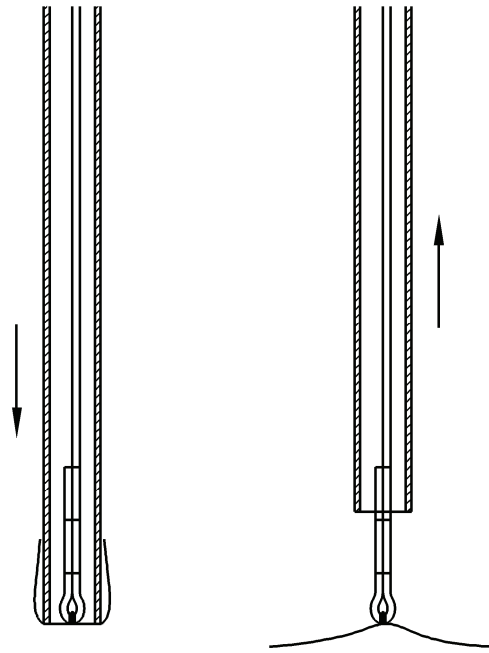


Bild A.4 — Beispiel eines Dränschuhs für einen Streifendrän

A.4.1.4 Vorkehrungen für den Dräneinbau

Die Zugfestigkeit des Streifendräns muss ausreichend hoch sein, um ein Brechen der Dräns während des Einbaus und danach zu verhindern. Die geforderte Zugfestigkeit hängt vom Typ der für die Arbeiten angewendeten Ausrüstung, von der Verfahrensweise beim Einbau, den Bodenbedingungen und der Einbautiefe des Dräns ab.

Sofern dies möglich ist, sollte der Dorn während des Einbaus mit Wasser gefüllt sein, um zu verhindern, dass der Streifendrän bei Entnahme des Dorns von Luft umgeben ist. Das Vorhandensein von Luft verringert die Durchlässigkeit des Filters und die horizontale Durchlässigkeit des den Drän umgebenden Bodens sowie die Durchflusskapazität. Eine hydrophile Beschichtung des Filters verbessert dessen Affinität gegenüber dem Wasser.

Bei Böden, die anfällig für Störungen sind, ist der statische Einbau dem dynamischen Einbau vorzuziehen.

Beim Dräneinbau entsteht eine gestörte Zone um den Dorn herum, in der bei manchen Bodentypen, insbesondere feinkörnige Böden mit gröberen Schichten, die Durchlässigkeit in horizontaler Richtung wesentlich verringert werden kann.

Trotzdem kann in einigen Fällen die undränierete Scherfestigkeit des Bodens hoch genug sein, dass das durch den Dorn entstandene Loch nicht in sich zusammenfällt und deshalb nach dem Herausziehen des Dorns eine offene Stelle zwischen dem Drän und dem Boden bleibt. Deshalb ist es schwierig, sowohl die Störwirkung als auch den Nenndurchmesser des Dräns zu bestimmen, die für die Bemessung zu berücksichtigen bzw. anzuwenden sind.

A.4.1.5 Faktoren, die die Wirksamkeit des Streifendräns beeinflussen

Durchflusskapazität

Es ist von Wichtigkeit, dass die Durchflusskapazität der Dräns (die Menge an Wasser, die je Zeiteinheit bei einem hydraulischen Gefälle von 1 in vertikaler Richtung durch den Drän fließt) ausreicht, um den erforderlichen Konsolidationsgrad entsprechend der Bemessung zu erreichen.

Die erforderliche Durchflusskapazität (siehe Anhang B) ist abhängig von der Tiefe des Dräneinbaus, dem Abstand zwischen den Dräns (Durchflusskapazität nimmt mit größerer Einbautiefe und geringerem Abstand zwischen den Dräns zu) sowie den Konsolidationsmerkmalen des Bodens (höhere Durchflusskapazität bei zunehmender Durchlässigkeit und Kompressibilität).

Die tatsächliche Durchflusskapazität der in den Boden eingebauten Dräns wird beeinflusst von den Eigenschaften der Streifendrängs, dem Einbauverfahren der Drängs (einschließlich der Auswirkungen der gestörten Zone, des durch den Dorn entstandenen Loches und dem Vorhandensein von Luft im Drän) und durch die Wechselwirkung zwischen dem Boden und dem Drän (seitlicher Erddruck gegen den Drän, mögliches Verstopfen des Filters und/oder des Kerns und der Effekt des Ausknickens).

In stark komprimierbaren Böden (z. B. Torf und Gytja) kann die während des Konsolidationsprozesses stattfindende relative Kompression zu Ausknicken oder Kräuseln der Drängs führen, was deren Durchflusskapazität bedeutend verringern kann, siehe Bild A.5. Ausknicken tritt üblicherweise im oberen Teil des Bodens auf. Die in Bild A.5 gezeigten extremen Ausknickbedingungen können nur in stark verformbaren Böden mit Vertikalspannungen in der Größenordnung von 50 % erwartet werden. Das ist bei normalen Boden- und Belastungsbedingungen nicht der Fall, bei denen die Vertikalspannungen üblicherweise 10 % bis 15 % betragen und Ausknickungserscheinungen keinen Einfluss auf die Durchflusskapazität haben.



Bild A.5 — Ausknicken und Kräuseln des Drängs durch sehr starke relative Kompression von Torf

A.4.1.6 Obere Dränebene

Für die Wirksamkeit einer vertikalen Dränanlage muss eine geeignete obere Dränebene (eine Schicht aus körnigem Material mit geeigneter Dicke und/oder eine geeignete Dränanlage aus Geotextilien oder geotextilverwandten Produkten) eingebaut werden, um das Risiko des Entstehens eines Rückstaus in den Drängs zu verhindern, der sich durch Wasser bildet, das durch die Drängs herausgepresst wird (siehe A.4.5). Der Rückstau in den Drängs verringert das hydraulische Gefälle zwischen Boden und Drängs und verlängert den Konsolidationsprozess.

Die obere Dränebene sollte beim Einsatz in Kältegebieten vor Frost geschützt werden.

A.4.1.7 Bestimmung der Durchflusskapazität von StreifendrÄns

Die Durchflusskapazität von StreifendrÄns hÄngt von der Struktur des DrÄns und dessen Bestandteilen ab. Sie kann nach Abschluss des Herstellungsprozesses mit Hilfe von PrÄufungen bestimmt werden, die die wesentlichen Faktoren, welche die Durchflusskapazität beeinflussen, berÄcksichtigen d. h. Seitendruck gegen den DrÄn, der zum Eindringen des Filters in die Röhren des Kerns föhrt, Eindringen feiner Bodenteilchen in die Röhren durch den Filter, mögliches Zusetzen der Röhren, Einfluss des Ausknickens auf die RöhrenflÄche und temperaturbedingte Auswirkungen. Diese PrÄufungen sind üblicherweise in einem Verfahren zur Qualitätslenkung eingeschlossen und müssen nicht für jeden Einbauvorgang von StreifendrÄns wiederholt werden. Die Kennwerte der Durchflusskapazität sollten vom Konstrukteur verwendet werden; auf diese Kennwerte sollte in der Verfahrensdarstellung zum DrÄneinbau verwiesen werden (Abschnitt 8).

Durchflusskapazität von geraden StreifendrÄns

Die Durchflusskapazität kann von dem nach EN ISO 12958 gemessenen Ableitvermögen abgeleitet werden.

ANMERKUNG Bei der Durchflusskapazität q_w , handelt es sich um das Wasserableitvermögen innerhalb der Ebene q_p , multipliziert mit der DrÄnbreite b und geteilt durch das hydraulische GefÄlle i . Bei üblichen Anwendungen lässt sich das Wasserableitvermögen innerhalb einer Ebene³⁾ bei einer Temperatur von 20 °C durch Anwendung eines Korrekturfaktors R_T nach EN ISO 12958 bestimmen.

Bei Anwendungen mit höheren Bodentemperaturen, wie z. B. Deponien und Baggerschlammlagerstellen sowie in tropischen Regionen sollten die PrÄufungen bei der für den betreffenden Ort höchsten Bodentemperatur durchgeführt werden.

Die Dauer der PrÄufung sollte auch berücksichtigt werden, und auf den Wert von q_p sollte ein Korrekturfaktor f_{cr} angewendet werden.

Die Durchflusskapazität eines DrÄns q_w (m^3/a) bei 20 °C wird wie folgt berechnet:

$$q_w = \frac{q_p b R_T}{i f_{cr}} = \frac{\theta b R_T}{f_{cr}}$$

Dabei ist

q_p das Wasserableitvermögen innerhalb der Ebene, in m^2/a ;

b die Breite des DrÄns, in m;

i das hydraulische GefÄlle;

$R_T = 1,763 / (1 + 0,037\,71\,T + 0,000\,22\,T^2)$, mit

T die Temperatur in °C;

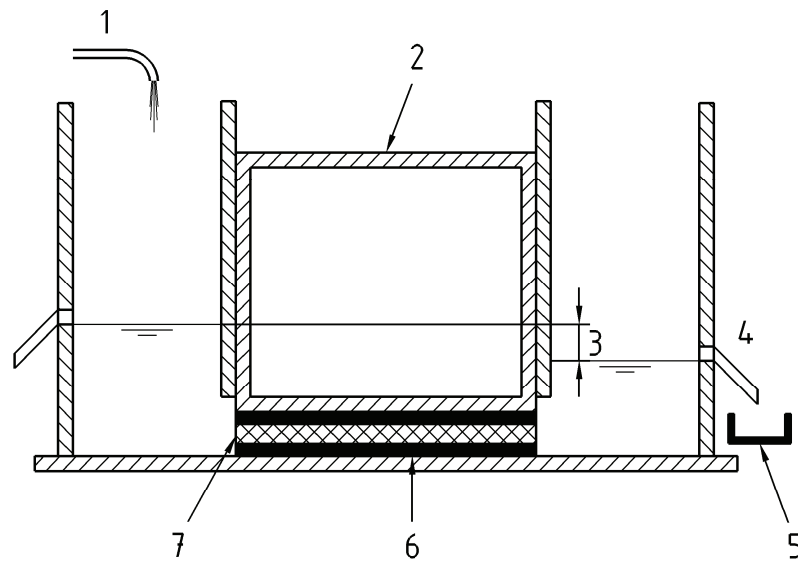
θ die Transmissivität⁴⁾, in m^2/a ;

f_{cr} der Kriechbeiwert.

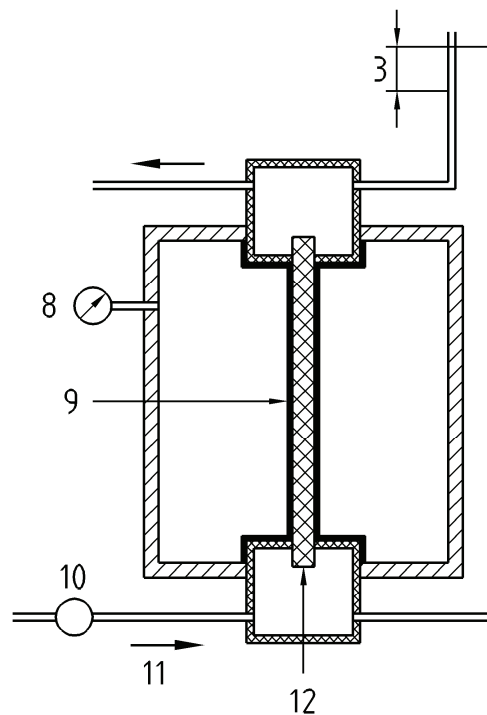
In Bild A.6 werden zwei Arten von PrÄufvorrichtungen zur Bestimmung der Durchflusskapazität nach EN ISO 12959 dargestellt. Bei PrÄufeinrichtung Nr. 1 ist der Probekörper von beiden Seiten mit einem geschlossenzelligen Schaumgummi mit einer Dicke von 10 mm bedeckt. Die Membran bei PrÄufeinrichtung Nr. 2 besteht aus Latex und weist eine Dicke von maximal 0,35 mm auf.

3) Wasser- und/oder Flüssigkeitsdurchfluss je Breitereinheit des DrÄns bei festgelegten GefÄllen in der Ebene des DrÄns.

4) Laminares Wasserableitvermögen eines DrÄns innerhalb einer Ebene, angegeben für ein hydraulisches GefÄlle von 1.



a) Prüfeinrichtung Nr. 1



b) Prüfeinrichtung Nr. 2

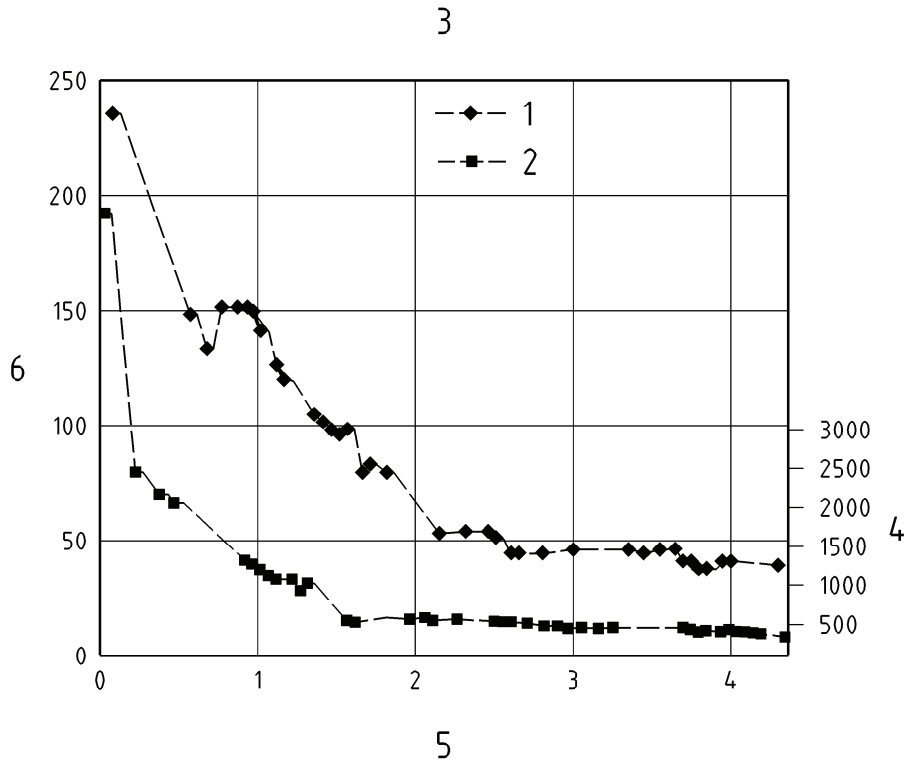
Legende

1 Wasserzufuhr	5 Wasseransammlung	9 Gummimembran
2 Last	6 Schaum	10 Durchflussmessgerät
3 Druckabfall	7 300-mm-Probe	11 Fließrichtung
4 Überlauf	8 Druckmessgerät	12 350-mm-Probe

Bild A.6 — Prüfgeräte zur Bestimmung der Durchflusskapazität [(Bild A.6 a)) Prüfeinrichtung Nr. 1 und (Bild A.6 b)) Prüfeinrichtung Nr. 2 nach EN ISO 12958]

Die Dauer der Prüfung der Durchflusskapazität beeinflusst das Wasserableitvermögen innerhalb der Ebene durch das Kriechen des Filters, das zu einem Eindringen des Filters in das Röhrensystem führt und dadurch die Durchflusskapazität verringert, siehe Bild A.7. Der vorstehend angeführte Kriechbeiwert f_{Cr} wird verwendet, um den Wert der stabilisierten Durchflusskapazität aus dem Ergebnis für eine kürzere Dauer abzuschätzen. Er hängt von der Prüfeinrichtung ab und sollte für jedes Prüfgerät bestimmt oder überprüft werden.

Die zeitabhängigen Schwankungen der Durchflusskapazität eines Streifendrängs, die in den zwei unterschiedlichen Prüfgeräten gemessen wurden, sind in Bild A.7 dargestellt.



Legende

- | | | | |
|---|---|---|----------------------------|
| 1 | Prüfeinrichtung Nr. 1 (ASTM) | 4 | Durchflusskapazität, m³/a |
| 2 | Prüfeinrichtung Nr. 2 (Delft) | 5 | Zeit, Wochen |
| 3 | Durchflusskapazität, gerade, bei 30 °C, 500 kPa | 6 | Durchflusskapazität, cm³/s |

Bild A.7 — Über die Dauer der Prüfung der Durchflusskapazität beobachtete Auswirkungen des Kriechens auf die Durchflusskapazität [6]

In Tabelle A.1 werden auf Erfahrungen beruhende Kriechbeiwerte für die beiden in Bild A.6 dargestellten Prüfeinrichtungen vorgeschlagen. Werden andere Arten von Prüfgeräten verwendet, sollten Kriechbeiwerte bestimmt werden, die auf gemessenen Daten beruhen und die denen in Bild A.7 dargestellten ähnlich sind.

Tabelle A.1 — Kriechbeiwerte (Werte für den Fall, dass keine früheren Daten vorliegen)

Prüfdauer Tage	Kriechbeiwert f_{cr}	
	Prüfeinrichtung Nr. 1	Prüfeinrichtung Nr. 2
2	10	5
7	8	3
30	3	1

Um den Kriechbeiwert für die Durchflusskapazität jedes Dräntyps zu bestimmen, kann gegebenenfalls eine 30-tägige Prüfung des Ableitvermögens innerhalb der Ebene durchgeführt werden. Bei gewöhnlichen Anwendungen können die Werte, die auf für die CE-Kennzeichnung erforderlichen Prüfungen beruhen, verwendet werden. Werden die Prüfungen mit Prüfeinrichtung Nr. 1 durchgeführt, müssen die gemessenen Kriechbeiwerte immer mit drei multipliziert werden.

Die Prüfungen der Durchflusskapazität sollten mit einem hydraulischen Gefälle von 0,1 sowie, entsprechend den jeweiligen Bemessungsbedingungen, unter einem statischen Druck von 20 kPa, 100 kPa oder 200 kPa sowie gegebenenfalls auch unter einem höheren statischen Druck durchgeführt werden.

Diese spezifischen Bemessungsbedingungen sind von der Tiefe des Dräneinbaus sowie der Last durch die Schüttung, die temporäre Auflast und/oder das Vakuum abhängig. Der Prüfdruck (kPa) kann nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$\sigma_t = f_m K_o \sigma'_v$$

Dabei ist

σ_t der während der Prüfung von außen aufgebrachte Druck;

f_m der Teilsicherheitsbeiwert für den Prüfdruck (1,2; siehe B.4.1.3);

K_o der Koeffizient für den Erdruhedruck (0,65 bis 0,75 bei Böden mit hohem Plastizitätsindex);

σ'_v der örtliche wirksame geostatische Druck in der Einbautiefe zuzüglich des durch die Schüttung, die temporäre Auflast und/oder das Vakuum in der Einbautiefe verursachten Anstieges der vertikalen Spannung.

Durchflusskapazität des ausgeknickten Streifendröns

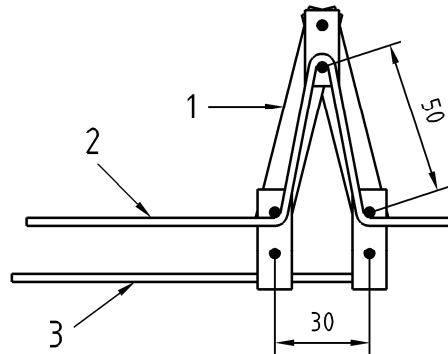
Der Einfluss des Ausknickens auf die Durchflusskapazität eines bestimmten Streifendröns sollte in der Bemessung beachtet werden, wenn die geschätzte vertikale Verformung des Bodens um den Dröns hoch ist (üblicherweise mehr als 20 %).

Die Prüfung der Durchflusskapazität an ausgeknickten Dröns sollte mit einem hydraulischen Gefälle von 0,1 sowie, entsprechend den jeweiligen Bemessungsbedingungen, unter einem statischen Druck von 20 kPa, 60 kPa oder 120 kPa sowie eventuell auch unter einem höheren statischen Druck durchgeführt werden. Das kann z. B. mit der in Bild A.8 dargestellten Prüfeinrichtung, die für Prüfeinrichtung Nr. 2 geeignet ist (Bild A.6), erfolgen.

Der Prüfbericht sollte die Angaben enthalten, die in EN ISO 12958:1999, Abschnitt 9 angegeben sind. Weiterhin ist empfehlenswert, die Ergebnisse der Prüfung der Durchflusskapazität, wie in Tabelle A.2 dargestellt, anzugeben.

ANMERKUNG Da die Prüfung bei einem sehr spitzen Winkel des Streifendrängs — ohne Messungen der mittleren Winkel — durchgeführt wird, dient die Durchflusskapazität des ausgeknickten Drängs als Index des Einflusses von Vertikalspannungen auf die Durchflusskapazität und sollte als solche vom Konstrukteur verwendet werden.

Maße in Millimeter



Legende

- 1 Stange A
- 2 Dränprobe
- 3 Führungsstange

Bild A.8 — Beispiel einer Prüfeinrichtung zur Prüfung der Durchflusskapazität eines ausgeknickten Drängs [12]

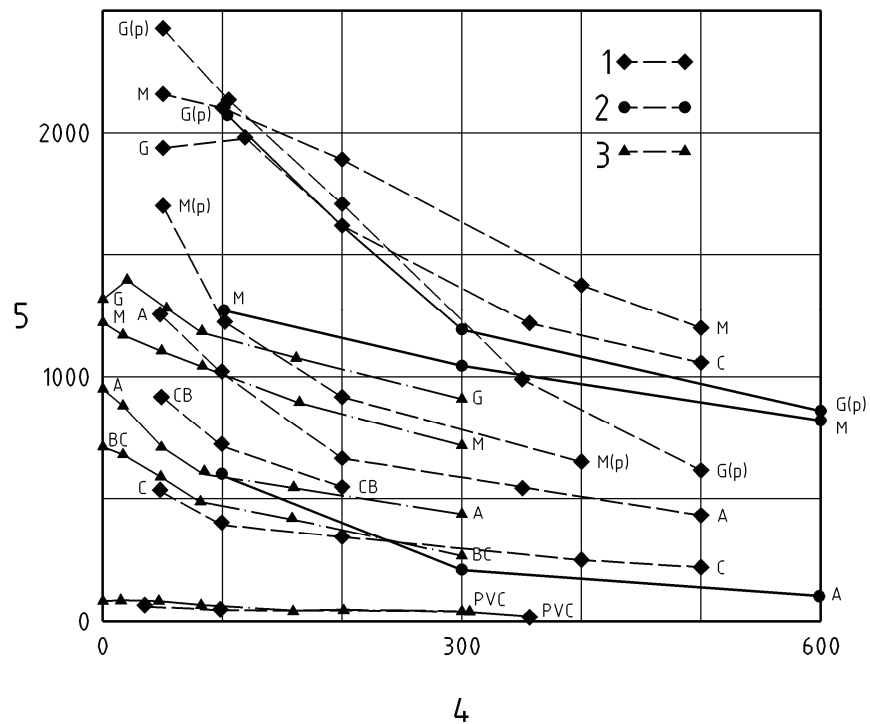
Tabelle A.2 — Durchflusskapazität q_w und q_{wb} (in m^3/a) für verschiedene statische Drücke (in kPa) und ein hydraulisches Gefälle $i = 0,1$

Probekörper	Gerader Drän				Ausgeknickter Drän			
	$q_w(20/0,1)$	$q_w(100/0,1)$	$q_w(200/0,1)$	$q_w(XXX/0,1)$	$q_{wb}(20/0,1)$	$q_{wb}(60/0,1)$	$q_{wb}(120/0,1)$	$q_{wb}(XXX/0,1)$
1								
2								
3								
Mittelwert								

Durchflusskapazität von Streifendrängs, die im Kontakt mit dem Boden sind

Die Werte für die Durchflusskapazität, die mit Prüfeinrichtungen der Art erreicht wurden, wie sie in den Bildern A.6 und A.7 dargestellt sind, weichen möglicherweise von denen ab, die sich ergeben, wenn der Drän von dem Boden umgeben ist, in den er eingebaut wird. Daher dienen die in der Prüfkammer erhaltenen Werte als Index der Werte, die bei den Feldversuchen zu erwarten sind. Offensichtlich wird die Durchflusskapazität in zunehmender Weise durch ein verstärktes Eindringen des Filters in die Röhren des Kerns verringert, zu dem es in Folge eines im Verlaufe des Konsolidationsprozesses zunehmenden wirksamen seitlichen Bodendrucks kommt.

Prüfungen der Durchflusskapazität an Streifendrängs, die im Labormaßstab in den Boden eingebaut und einer zunehmenden wirksamen seitlichen Spannung ausgesetzt werden, haben zu den in Bild A.9 dargestellten Werten geführt. In den „italienischen Prüfungen“ [24] wurden die Drängs im natürlichen Maßstab geprüft. In den „schwedischen Prüfungen“ [19] und „japanischen Prüfungen“ [26] wurden die Drängs mit einer verringerten Breite (40 mm bzw. 30 mm) geprüft.

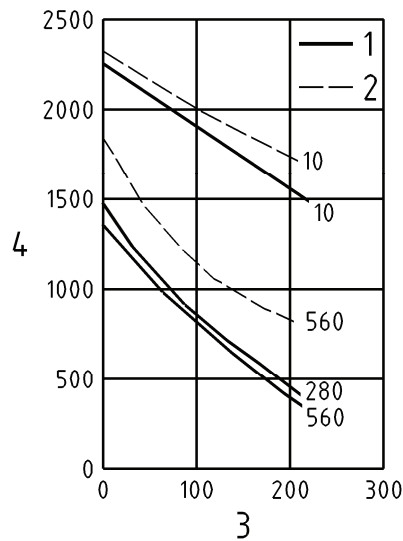


Legende

- | | | | |
|---|---|-----|--|
| 1 | Prüfungen im verkleinerten Maßstab (Schweden) | C | = Colbond |
| 2 | Prüfungen im natürlichen Maßstab (Italien) | CB | = Castle Board |
| 3 | Prüfungen im verkleinerten Maßstab (Japan) | G | = Geodrain |
| 4 | wirksamer Seitendruck, kPa | M | = Mebradrain |
| 5 | Durchflussskapazität, m ³ /a | PVC | = PVC-Drän |
| | A = Alidrain | (p) | weist auf Filtermantel aus speziell hergestelltem Papier hin |
| | BC = Bando Chemical | | |

Bild A.9 — Ergebnisse von im Labormaßstab ausgeführten Prüfungen der Durchflussskapazität für verschiedene Streifendrains. Drains von Boden umschlossen [19], [24], [26]

Aufgrund der bakteriologischen Aktivität und Pilzbefall kann ein Altern der Filter im Boden erwartet werden. Die Ergebnisse einer Untersuchung der Auswirkungen der Alterung auf die Durchflussskapazität durch [29] sind in Bild A.10 dargestellt. Die Prüfungen wurden an Dränproben durchgeführt, die unterschiedlich lange nach dem Einbau aus Torf und Gytija herausgezogen wurden.



Legende

- 1 Torf
- 2 Gytija
- 3 wirksamer Seitendruck, kPa
- 4 Durchflusskapazität, m³/a

Bild A.10 — Einfluss einer zeitabhängigen Verschlechterung des Filterzustandes auf die Durchflusskapazität [29]. Die Anzahl der Tage, die die Dräns nach dem Einbau im Boden verblieben, ist an jeder Kurve angegeben. Durchgezogene Linien stellen Dräns dar, die in Torf eingebaut wurden, gestrichelte Linien in Gytija eingebaute Dräns

Ein Zusetzen des Filters und/oder des Kerns durch feinkörnigen Ton oder kolloide Teilchen wird üblicherweise durch Festlegung eines Maximalwertes der charakteristischen Öffnungsweite O_{90} des Filters (wie für ein Geotextil durch EN ISO 12956 festgelegt), der auf Erfahrungen und Laborprüfungen beruht und an die Korngrößenverteilung des Bodens angepasst werden sollte, verhindert.

A.4.2 Vorgefertigte zylindrische Dräns

A.4.2.1 Arten von Dräns

Ein vorgefertigter Drän besteht aus einem rohrförmigen Kern, üblicherweise mit einem Außendurchmesser von 50 mm und einem Innendurchmesser von 45 mm, hergestellt aus einem ringförmig gewellten, perforierten Kunststoff, beständig gegen Druck, Stöße, plötzliche Zugspannung und Alterung, umgeben von einem Filterschlauch aus Geovliesstoff.

A.4.2.2 Einbauverfahren

Die vorgefertigten zylindrischen Dräns werden in einen Hohldorn eingebaut; dieser hat einen zylindrischen Querschnitt mit einem Außendurchmesser, der üblicherweise 100 mm beträgt. Der Dorn, der üblicherweise durch statische Belastung in den Boden gepresst wird, benötigt genügend Steifigkeit. Ein Dränschuh wird vor dem Einbau an der Spitze des Dräns befestigt und verhindert, dass während des Einbaus Boden in den Dorn eindringt.

Nach dem Herausziehen des Dorns sind die Dräne so zuzuschneiden, dass sie sich mit der Dränschicht in engem Kontakt befinden, vorzugsweise etwa 25 cm oberhalb der Arbeitsebene (obere Dränebene).

A.4.2.3 Faktoren, die die Wirksamkeit der Dräns beeinflussen

Zylindrische Dräns müssen genügend Durchflusskapazität für jedes Projekt der Vertikaldränung haben. Der einzige bekannte Faktor, der ihre Wirksamkeit einschränken kann, ist eine gestörte Zone um den Drän herum, die durch das Einbringen des Dorns entsteht. Erfahrungen zufolge kann der Konsolidationsprozess unter Vernachlässigung der Auswirkungen des Dorneinbaus und der gestörten Zone theoretisch analysiert werden, unter der Annahme, dass der Durchmesser des Dräns 50 mm beträgt.

A.4.2.4 Weitere Anwendungsgebiete

Ringförmig gewellte, perforierte zylindrische Dräns, bestehend aus einem Rohr aus hochdichtem Polyethylen, umgeben von einem Filter aus Geovliesstoff, wurden in den USA zur Verringerung des Verflüssigungspotentials in Erdbebenregionen entwickelt [44].

A.4.3 Sanddräns

A.4.3.1 Arten von Sanddräns

Sanddräns bestehen üblicherweise aus Sandsäulen mit einem Durchmesser von 18 cm bis 50 cm, die in den Boden eingebaut werden und direkten Kontakt zum Boden haben.

Der für die Sanddräns verwendete Sand sollte vorzugsweise innerhalb der Korngrößengrenzen liegen, die in Bild A.11 durch die schraffierte Fläche dargestellt sind. Es existieren jedoch Berichte zu vielen Fällen, in denen Sanddräns erfolgreich funktioniert haben, obwohl sie eine breitere Korngrößenverteilung aufwiesen, die außerhalb der Grenzen des schraffierten Bereiches lagen. Die Korngrößenverteilung des in diesen Fällen verwendeten Sandes fällt in die in Bild A.11 durch die äußeren durchgehenden Linien angegebenen Grenzen.

A.4.3.2 Einbauverfahren

Sanddräns werden entweder durch so genannte Nichtverdrängungseinbauverfahren oder durch so genannte Verdrängungseinbauverfahren eingebaut.

Die *Nichtverdrängungseinbauverfahren* umfassen Bohren mit Aufsteckbohrer/Stangenbohrer, Vorschubbohren, Hochdruckspülen, Schneckenbohren und Spülbohren. Das *Verfahren mit Stangenbohrer* besteht im Versenken des Stangenbohrers bis zur benötigten Tiefe, der Bohrer wird dann herausgezogen, während der Sand durch die Achse zum Loch unterhalb der Bohrerspitze transportiert wird. Das Verfahren mit Hohlbohrschnecke besteht im Versenken des Stangenbohrers bis zur benötigten Tiefe, danach wird er herausgezogen, während der Sand durch die Hohlachse zur Öffnung unter der Bohrerspitze transportiert wird. Beim *Hochdruckspülverfahren* wird das Loch, das mit Sand gefüllt werden soll, durch Spülen mit Hochdruck und mit an den Bodenzustand angepasster Flussmenge geschaffen. Sand wird dann ohne Verdichten in das Loch geschüttet.

Die *Verdrängungseinbauverfahren* umfassen Einbauverfahren mit Aufsatzrohr bzw. Vibrationseinbauverfahren. Bei dem *Verfahren mit Aufsatzrohr* wird ein hohles Aufsatzrohr mit einer Klappe an dessen unterem Ende in den Boden gerammt. Wird das Aufsatzrohr wieder herausgezogen, öffnet sich die Klappe, und der in das Aufsatzrohr gefüllte und mit Wasser gesättigte Sand schafft dabei den Sanddrän. Beim *Vibrationseinbauverfahren* wird ein Aufsatzrohr mit oder ohne Klappe am unteren Ende mit Hilfe eines auf dem Aufsatzrohr angebrachten Aufsatzrüttlers bis zur erforderlichen Tiefe in den Boden eingebracht. Nach dem Einbau wird der Aufsatzrüttler ohne Unterbrechung aufwärts gezogen, ohne dabei die aus dem unteren Ende des Aufsatzrohrs herausfallende Sandfüllung zu verdichten.

Alternativ dazu werden die Dräns mit Hilfe eines Tiefenrüttlers eingebaut, der nach dem Einbau ohne Unterbrechung aufwärts gezogen wird, ohne die Sandfüllung zu verdichten.

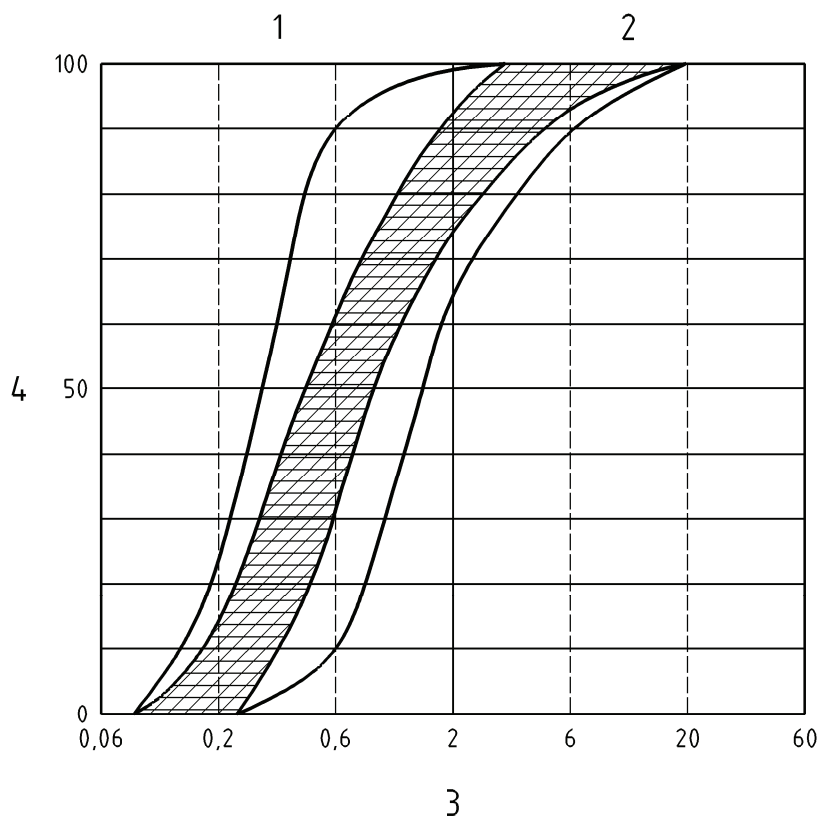
A.4.3.3 Wirksamkeit der Sanddräns

Kontinuität und Durchmesser

Die Kontinuität der Sanddräns hat große Bedeutung; der Durchmesser der eingebauten Dräns sollte mit den Anforderungen an die Bemessung übereinstimmen. Die Kontinuität ist möglicherweise gefährdet, wenn das Loch zuerst geschaffen und danach mit Sand gefüllt wird. Dies ist der Fall beim Hochdruckspülverfahren und beim *Verfahren mit massiver Bohrschnecke*. Die Kontinuität und ein annähernd konstanter Durchmesser des Dräns werden bei den Verfahren, bei denen der Sand in ein Rohr geschüttet wird, das in den Boden getrieben wird sowie bei dem Verfahren mit Hohlbohrschnecke sichergestellt.

Durchflusskapazität

Die Durchflusskapazität der Sanddräns mit der in Bild A.11 angegebenen bevorzugten Korngrößenverteilung schwankt zwischen 800 m³/a (25 cm³/s) für Sanddräns mit einem Durchmesser von 0,18 m und 4 000 m³/a (127 cm³/s) für Sanddräns mit einem Durchmesser von 0,4 m. Die Anforderungen an die Durchlässigkeit der Sanddräns hängen von der Durchlässigkeit des umgebenden Bodens und der Tiefe des Dräneinbaus ab (siehe Anhang B, Bild B.2 bis B.5). Diese Werte sind höher als es bei Einbauorten für Vertikaldräns erforderlich ist. Deshalb wird bei Sanddräns üblicherweise davon ausgegangen, dass sie durch den Brunnenwiderstand nicht beeinflusst werden.



Legende

- 1 Sand
- 2 Kies
- 3 Korngröße d in mm
- 4 Massenanteil in % an der Gesamtmasse der Körner $< d$

Bild A.11 — Korngrößengrenzen bei körnigem Material, das bei Sanddräns zum Einsatz kommt

Die beschriebenen Werte der Durchflusskapazität beruhen auf der Voraussetzung, dass der für die Sanddräns verwendete Sand während des Einbauprozesses mit Wasser gesättigt ist. Das Eindringen von Luft in den Sand verringert die Durchflusskapazität wesentlich.

Wechselwirkung mit umgebendem Boden

Ein Einbau mit stirnseitig geschlossenen Rohren (Dornen) führt zu seitlicher Verdrängung des das Rohr umgebenden Bodens, was von einer allgemeinen Störung und dem Entstehen einer gestörten Zone in den Bereichen begleitet wird, in denen es bei horizontalen Schichten mit höherer Durchlässigkeit zu vertikalen Verwerfungen kommt. Der Einbau kann auch zu vertikalen Rissen im den Drän umgebenden Boden führen, die sich mit Sand füllen [37].

Der Einbau mit Hochdruckinjektion führt beim Einbau nur zu minimalen Störungen des Bodens. Der Einbau erzeugt ein Loch, das größer als der Nenndurchmesser ist; deshalb wird es als besonders wirkungsvoll angesehen. Der Injektionsdruck und der Wasserfluss müssen für die Bodenbedingungen angemessen sein.

Während des Einbaus sollte auf das Risiko von Abschnürungen oder möglichem Versagen des Dräns durch unzureichende Unterstützung durch den umgebenden Boden hin überwacht werden. Dies kann durch laufende Überprüfung der Menge an Sand erfolgen, die in die Dräns eingefüllt wird. Abschnürungen können bei Quickton ein ernstes Problem darstellen.

A.4.3.4 Geotextilumschlossene Sanddräns

Das Risiko der Abschnürung von Sanddräns kann durch Umschließen der Dräns mit Geotextilien vermieden werden. Ursprünglich wurde dies ausschließlich bei Dräns mit geringem Durchmesser angewendet, heutzutage wird dieses Verfahren jedoch auch bei Dräns mit größerem Durchmesser eingesetzt, wie vorstehend erwähnt.

Die Durchflusskapazität der Sanddräns mit der in Bild A.11 angegebenen bevorzugten Korngrößenverteilung beträgt zwischen $350 \text{ m}^3/\text{a}$ ($11 \text{ cm}^3/\text{s}$) für Sanddräns mit einem Durchmesser von $0,12 \text{ m}$. Das bei Gewebedräns mit geringem Durchmesser verwendete Material, beispielsweise Sanddochte, sollte gröber sein als in Bild A.11 dargestellt, damit die Anforderungen an die Durchflusskapazität erfüllt werden.

A.5 Obere Dränebene und Arbeitsebene

Für die Wirksamkeit der vertikalen Dränanlage sollte eine geeignete obere Dränebene (eine Schicht aus körnigem Material mit angemessener Dicke und/oder einem Geotextil oder geotextilverwandten Produkten) eingebaut werden. Die Konsolidationssetzung führt zu einem Eindrücken des Mittelteils der oberen Dränebene. Daher können temporäre Brunnen zur Entnahme des aus der oberen Dränebene abgezogenen Wassers erforderlich sein, insbesondere in Fällen mit sehr breiten oberen Dränebenen. Falls erforderlich, sollte die obere Dränebene vor Frost geschützt werden.

Die Durchlässigkeit der oberen Dränebene muss ausreichend hoch sein, sodass in den Dräns kein Rückstau auftritt, wie er in Bild A.12 gezeigt wird.



Bild A.12 — Beispiel einer oberen Dränebene aus körnigem Material mit unzureichender Durchlässigkeit, in dem Wasser gefangen wird, was zu einem Rückstau im Drän führt

Die Ausführung von Vertikaldränungsprojekten erfordert eine Arbeitsebene mit einer Oberfläche, die geeignet ist, den vertikalen Einbau der Dräns zu erleichtern. Die Arbeitsebene muss in der Lage sein, die Einbauausrüstung zu tragen. Das Vorhandensein von Taschen und Linsen aus weichem Boden in der Arbeitsebene kann die örtliche Tragfähigkeit der Arbeitsebene wesentlich verringern und zu einem Umkippen der Einbauanlage führen. Das Aufbringen einer geotextilen Trennschicht unter der Arbeitsebene vermeidet möglicherweise das Risiko von Ungleichmäßigkeiten in der Arbeitsebene.

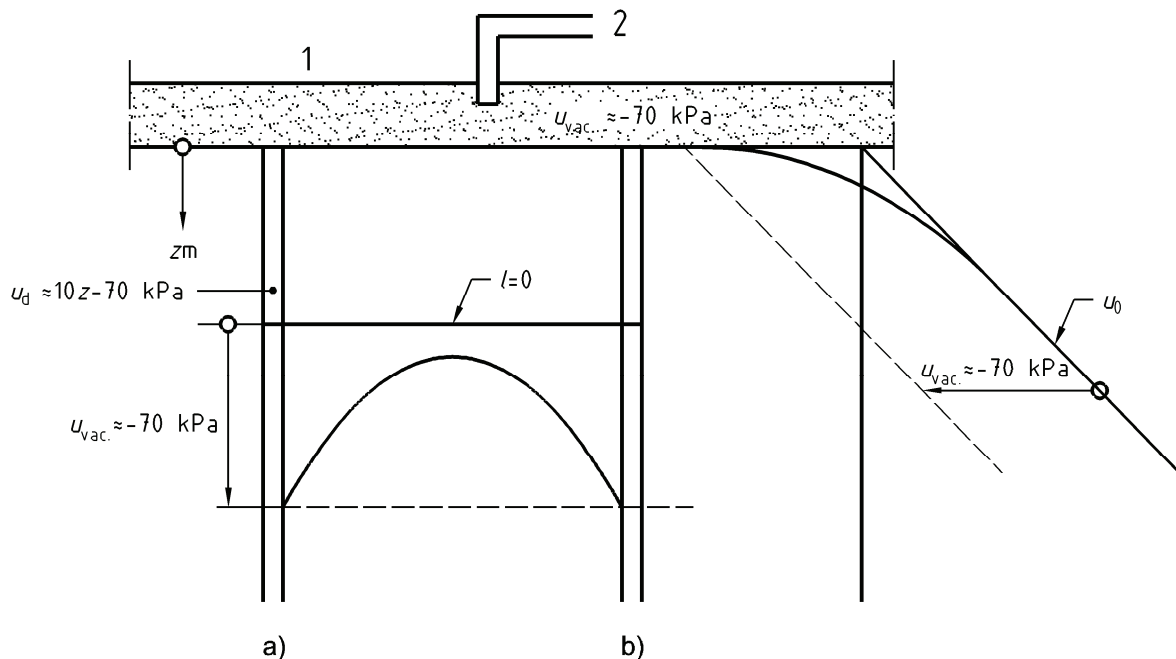
A.6 Belastung

Der Belastungsvorgang besteht üblicherweise aus dem Aufbringen einer Flächenbelastung auf die Oberseite der oberen Dränebene. Dies stellt eine kritische Phase der Projekte von Vertikaldräns dar. Die Belastung muss auf eine Weise erfolgen, die die Stabilität des Bodens nicht gefährdet. Deshalb muss die für die Belastung verwendete Masse der Schüttung pro Volumeneinheit festgelegt und kontrolliert werden. Die undrained Scherfestigkeit des Bodens kann beeinträchtigt werden, nicht nur durch den Dräneinbau selbst, sondern auch durch den Belastungsvorgang, wenn dieser mit schwerer Ausrüstung erfolgt. In den meisten Fällen ist es erforderlich, den Aufschüttvorgang durch Beobachtungen der Setzungen und des Porenwasserdrucks zu überwachen.

Ist die Scherfestigkeit des Bodens zu gering, um eine Schüttung bis zur vollständigen Höhe zuzulassen, sind Belastungsbermen erforderlich. Alternativ kann die Belastung schrittweise durchgeführt werden, gefolgt von einer Untersuchung der für die Durchführung des nächsten Belastungsschrittes erforderlichen Zunahme der Scherfestigkeit und des erforderlichen Ausgleichs des Porenwasserüberdrucks während des Konsolidationsprozesses und so weiter. Bei einer schrittweisen Belastung muss die festgelegte Dicke jeder Dammlastschicht überprüft werden, um eine übermäßige Belastung und ein daraus folgendes Versagen zu vermeiden.

Alternativ zur externen Belastung oder in Kombination mit dieser kann auch die Grundwasserabsenkung in durchlässigen Schichten in Verbindung mit den Dräns angewendet werden.

An Orten für den Dräeinbau, an denen die Stabilitätsbedingungen nicht zufrieden stellend sind, kann die Flächenbelastung durch das Vakuumverfahren ersetzt oder verstärkt werden, Bild A.13. In diesem Fall wird die obere Dränebene mit einer luftdichten Abdeckung versehen und entlang ihrer Außengrenzen hermetisch abgedichtet. Die obere Dränebene wird mit einer Vakuumpumpe verbunden, die in den Dräns im Verhältnis zum Porenwasserdruck im Boden Unterdruck erzeugt und damit zur Konsolidation führt [9] [10]. Der durch das Vakuumverfahren erzeugte Unterdruck beträgt in diesem Fall maximal 70 kPa bis 80 kPa.



Legende

d_u Porenwasserdruck in den Dräns

u_{vac} Unterdruck (angenommen, dass er einem Vakuum von 70 % des Atmosphärendrucks entspricht)

a) Ausgleich des Porenwasserdrucks durch Dräns

b) Ausgleich des Porenwasserdrucks ohne Dräns

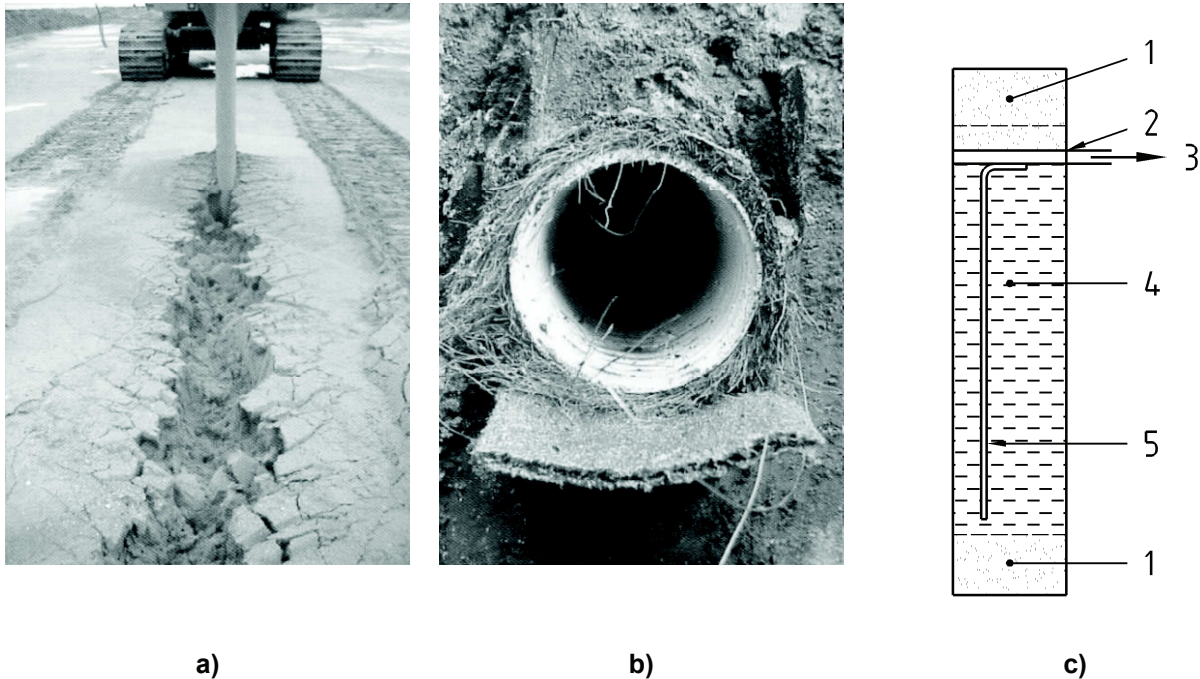
1 luftdichte Abdeckung

2 zur Vakuumpumpe

Bild A.13 — Skizze des Vakuumverfahrens und dessen Auswirkungen auf den Porenwasserdruck sowohl für den horizontalen Porenwasserfluss in Richtung der Dräns (a) als auch für den vertikalen Porenwasserfluss zwischen den Dräns (b)

Ein weiteres Verfahren, ein Vakuum zu erreichen [40], ist in Bild A.14 dargestellt. Bei dieser Anlage werden die Streifendräns am Boden von Gräben abgeschnitten, die entlang jeder Reihe von Vertikaldräns bis zu einer Tiefe von 1 m unterhalb der Arbeitsebene ausgehoben werden. Jede Reihe von Streifendräns wird dann mit einem horizontalen kreisförmigen Drän verbunden, der mit einem Auskleidungstreifen abgedeckt ist. Die zylindrischen Dräns werden mit einer Vakuumpumpe verbunden, und der auf diese Weise in den zylindrischen Dräns erreichte Unterdruck wird in die Vertikaldräns überführt.

Ein Vorteil dieser Anlage ist es, dass im Gegensatz zu herkömmlichen Anlagen keine luftdichte Abdeckung über die gesamte Fläche erforderlich ist. Ein Nachteil ist es, dass in der oberen 1 m dicken Schicht kein Unterdruck erzeugt wird. In diesem Fall beträgt der maximal erreichte Unterdruck etwa 50 kPa.



Legende

- 1 Sand
- 2 Auskleidungsstreifen
- 3 zur Vakuumpumpe
- 4 Ton
- 5 Vertikaldräns

Bild A.14 — Einbau eines horizontalen zylindrischen Dräns (links) und dessen Verbindung mit den Vertikaldräns

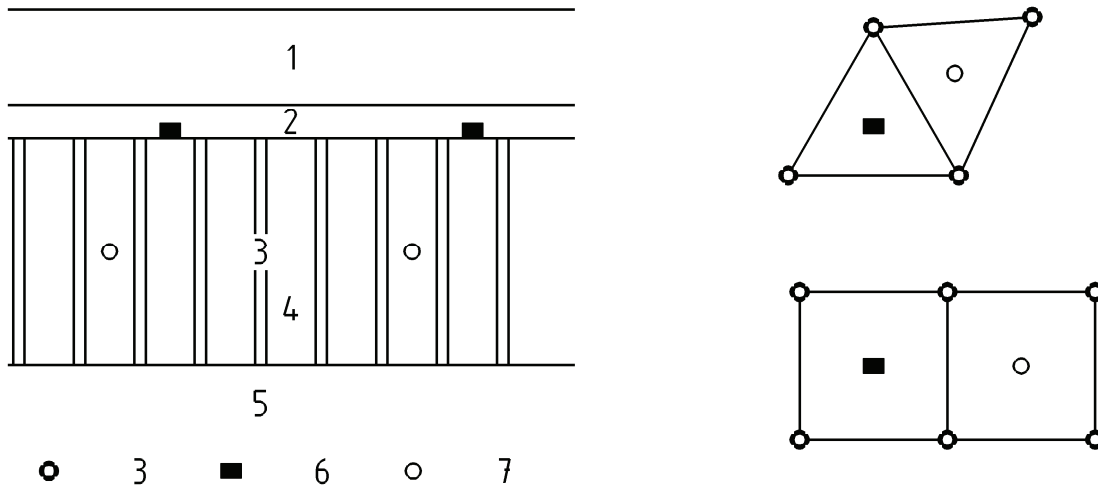
A.7 Überwachung

Die Auswirkungen der vertikalen Dränung sollten sowohl durch Messungen der Setzungen als auch des Porenwasserdrucks überwacht werden. Die gemessenen Werte werden zum Überprüfen der tatsächlichen Konsolidationsgeschwindigkeit und der bei der Bemessung getroffenen Annahmen verwendet. Dabei ist es — sowohl im Hinblick auf die Auswirkungen des Dräneinbaus selbst (Porenwasserüberdruck aufgrund von durch den Dräneinbau verursachten Störungen und dessen mögliche negative Auswirkungen auf die Stabilität) als auch im Hinblick auf die Auslegung der erhaltenen Ergebnisse der Beobachtung — wichtig, das Überwachungssystem rechtzeitig vor dem Einbau der Dräns einzubringen.

Das Ziel der Bodenverbesserung durch vertikale Dränung besteht im Allgemeinen darin, einer nicht annehmbaren Setzung vorzubeugen. Daher stellen die Beobachtungen der Setzung einen wesentlichen Bestandteil des Überwachungssystems dar.

Die Beobachtung des Porenwasserüberdrucks mit Hilfe von in unterschiedlichen Tiefen eingebauten Piezometern ist zweifelsfrei die geeignetste Art zu überprüfen, ob die Konsolidation den bei der Bemessung festgelegten Grad erreicht hat. Die Piezometer sollten mittig zwischen die Dräns dort platziert werden, wo die Konsolidationsgeschwindigkeit am geringsten ist. Die Auslegung der Ergebnisse von Messungen des Porenwasserdrucks kann jedoch relativ kompliziert sein. Die Ergebnisse sind von der Position des Piezometers in Bezug auf den Drän abhängig (die von der vorgesehenen Position abweichen kann); das Piezometer (die Spitze des Filters) sinkt im Verlaufe der Konsolidation ab; die Ergebnisse können durch Porenwasserrückstau aus den umgebenden Bereichen beeinflusst sein; die Entwicklung von Gas kann zu falschen Ergebnissen führen usw. Darüber hinaus ist es möglich, dass die Situation in Bezug auf den Porenwasserdruck nach Abschluss der Konsolidation nicht wieder in den ursprünglichen Gleichgewichtszustand zurückkehrt. Trotz dieser Probleme stellen Messungen des Porenwasserdrucks einen wichtigen Bestandteil des Überwachungssystems dar, und die in Bezug auf die erreichte Bodenverbesserung gezogenen Schlussfolgerungen sollten auf Beobachtungen sowohl der Setzungen als auch des Porenwasserdrucks beruhen.

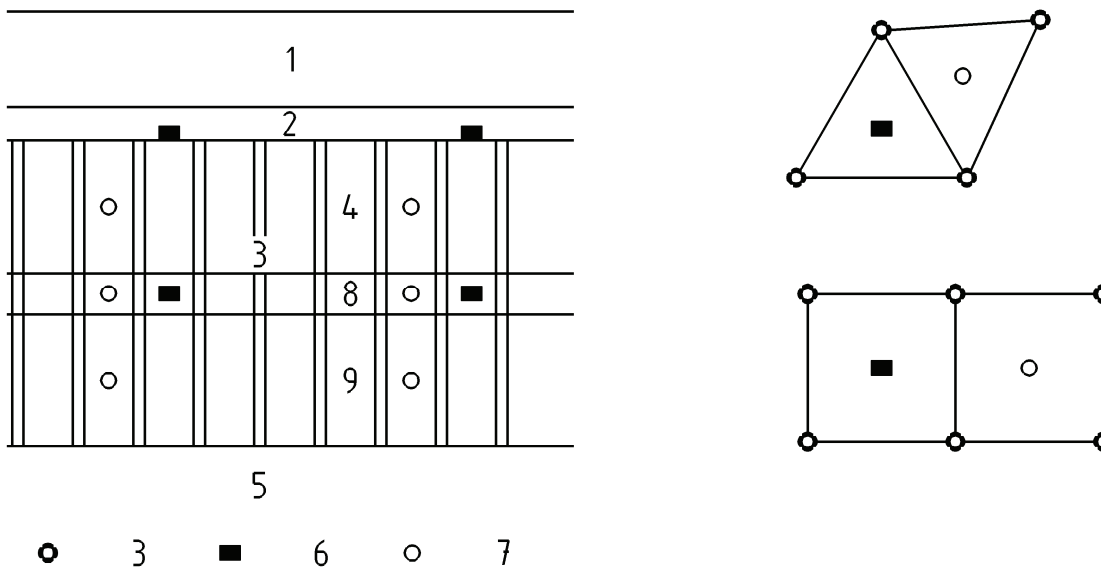
Typische Standorte für Beobachtungen der Setzungen und Porendrücke bei homogenem Boden mit begrenzter Dicke sind in Bild A.15 und bei geschichtetem Boden in Bild A.16 dargestellt. Die Anzahl der Messprofile hängt von der Größe der Baustelle sowie der Dicke und der Schichtung der komprimierbaren Schichten ab, die durch Vertikaldränung behandelt werden.



Legende

- | | |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 Damm | 5 unterliegende durchlässige Schicht |
| 2 obere Dränebene und Arbeitsebene | 6 Setzungsmessgerät |
| 3 Vertikaldrän | 7 Piezometer |
| 4 komprimierbarer Boden | |

Bild A.15 — Typische Messgeräte zur Überwachung der Wirksamkeit der Vertikaldränung (einfacher Fall)



Legende

- | | |
|--------------------------------------|----------------------------|
| 1 Damm | 6 Setzungsmessgerät |
| 2 obere Dränebene und Arbeitsebene | 7 Piezometer |
| 3 Vertikaldrän | 8 durchlässige Sandschicht |
| 4 komprimierbarer Boden | 9 komprimierbarer Boden |
| 5 unterliegende durchlässige Schicht | |

Bild A.16 — Typische Messgeräte zur Überwachung der Wirksamkeit der Vertikaldränung (Baustelle mit verschiedenen Schichten)

In der Praxis ist der Konsolidationsgrad zu beachten, der in den Bodenschichten erreicht wird, die den niedrigsten Konsolidationskoeffizienten haben (und die üblicherweise die ungünstigsten Kompressionsmerkmale besitzen). Bei homogenem Bodenzustand wird der niedrigste Konsolidationsgrad dort erreicht, wo die vertikale eindimensionale Konsolidation gering ist, d. h. in der Mitte der Tonschicht. Ist die Durchflusskapazität der Dräns zu gering, beeinflusst dies den Konsolidationsgrad, der mit zunehmender Tiefe des Einbaus erreicht wird, in starkem Maße. Durch die ledigliche Verwendung von Beobachtungen der Oberflächensetzung als Mittel zur Überprüfung des über die gesamte Bodenschicht erreichten Konsolidationsgrades können dementsprechend falsche Schlussfolgerungen getroffen werden.

Anhang B (informativ)

Aspekte der Bemessung

B.1 Allgemeines

Dieser Anhang behandelt bestimmte Aspekte der Bemessung von vertikalen Dränungssystemen, einschließlich der Bewertung der Bodenmerkmale und des Einflusses der Dränmerkmale, des Dränrasters und der Tiefe des Dräneinbaus. Der Anhang behandelt nicht die ausführlichen Grundsätze oder die Verfahren der geotechnischen Bemessung, für die auf EN 1997-1 und auf EN 1997-2 verwiesen wird.

Der Anwendungsbereich der vertikalen Dränung umfasst den Umgang mit den mit folgenden Aspekten zusammenhängenden Problemen und deren Lösung:

- 1) Konsolidationssetzung in schwach durchlässigen Böden (als Ergebnis der Flächenbelastung oder der Grundwasserabsenkung);
- 2) Stabilität/Standsicherheit (von Bauwerken und Dämmen).

Als ein Ergebnis der Bodenverbesserung durch vertikale Dränung können die Auswirkungen der dynamischen und zyklischen Belastung (z. B. in Erdbebenregionen) ebenso wie die Auswirkungen von Schwingungen auf Bauwerke und Menschen verringert werden. Die vertikale Dränung kann auch dazu verwendet werden, kontaminierten Boden zu sanieren und das Verflüssigungspotential abzuschwächen.

Die Bemessung der vertikalen Dränung umfasst die beiden Phasen der funktionalen Bemessung und der Prozessbemessung:

- 1) In der ersten Phase muss der Bedarf für die vertikale Dränung quantifiziert werden. Diese Phase der funktionalen Bemessung definiert die Belastung und den Dränabstand, mit denen die gewünschten Auswirkungen auf die Konsolidations- und Setzungsgeschwindigkeit und möglicherweise auf die undränierete Scherfestigkeit des Bodens erzielt werden. Die Zielsetzungen sind mit der Bodenverbesserung durch Vorbelastung und der Möglichkeit der stufenweisen Konstruktion eines Dammes verbunden sowie mit der Schaffung zufrieden stellender Dränungspfade für Porenwasser im Fall von Verflüssigung.
- 2) In der zweiten Phase muss das Verfahren des Dräneinbaus und die zugehörige Funktionsweise in der Praxis bemessen werden. Diese Phase der Prozessbemessung berücksichtigt die Auswirkungen des Dräneinbaus auf den Boden, die Art und die Maße der Dräns, das mögliche Ausknicken im Fall übermäßiger Spannungen in einigen Bodenschichten usw.

B.2 Bemessungsprozess

Vertikale Dräns können für verschiedene Zwecke verwendet werden. Der Bemessungsprozess für vertikale Dräns schließt jedoch immer die in Bild B.1 angeführten Vorgänge ein: die Zielsetzung (Bemessungsgrundlage) und die Bodeneigenschaften (erste Reihe der Kästchen) stehen in Wechselwirkung mit der Setzungs- und Stabilitätsanalyse zum Erfüllen der an die Wirkungen der Dräns gestellten Anforderungen, d. h., um einen bestimmten Grad globaler und/oder lokaler Konsolidation innerhalb eines bestimmten Zeitraums zu erreichen.

Die Behandlung des Bodens durch vertikale Dränung und die zugehörige Belastung sind so zu bemessen und auszuführen, dass das vom behandelten Boden getragene Bauwerk während dessen vorgesehener Lebensdauer und mit einem angemessenen Grad an Zuverlässigkeit und Kostenwirksamkeit für den bestimmungsgemäßen Gebrauch einsatzfähig bleibt und allen Einwirkungen und Einflüssen standhält, die wahrscheinlich auftreten werden. Dies erfordert, dass die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit und der Tragfähigkeit erfüllt werden.

Die Anforderungen an die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit und der Tragfähigkeit sind durch den Kunden festzulegen. Die Bemessung muss den Anforderungen nach EN 1997-1 entsprechen. Die Beobachtungsmethode, die eine Anpassung der Bemessung auf festgelegte Weise umfasst, kann einen wichtigen Bestandteil der Bemessung darstellen.

Bei der Bemessung müssen die Lastenkombinationen berücksichtigt werden, die während Konstruktion und Betrieb auftreten können. Dabei müssen die bekannten Auswirkungen des Dräneinbaus auf die Eigenschaften des Bodens einbezogen werden.

Der Einbau von Vertikaldräns kann zu einem Porenwasserüberdruck führen und eine kurzfristige Verringerung der undrained Scherfestigkeit verursachen.

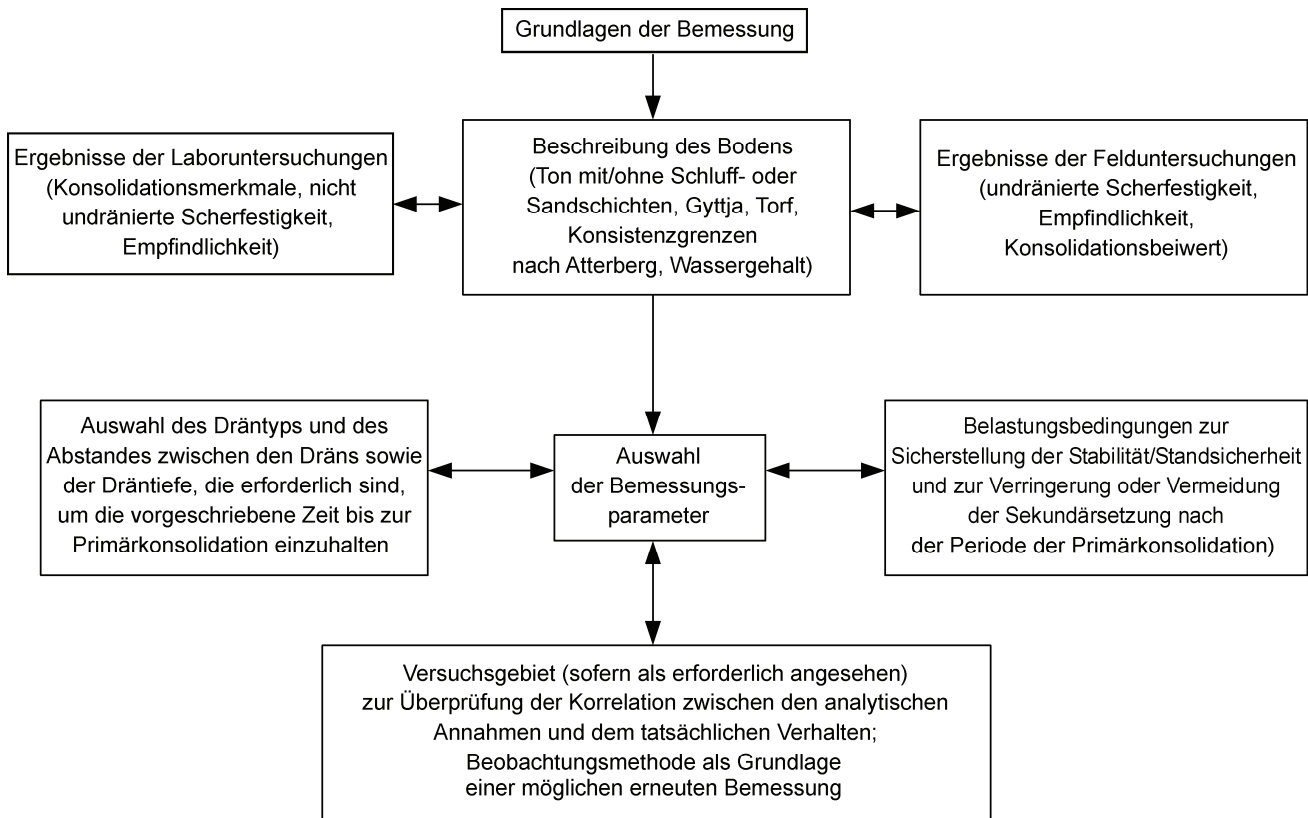


Bild B.1 — Diagramm des Bemessungsprozesses, einschließlich der Labor- und Felduntersuchungen, der funktionalen Bemessung und der Feldversuche

B.3 Untersuchungen für die vertikale Dränung

B.3.1 Allgemeines

Die Merkmale des Untergrunds werden üblicherweise mit Hilfe von Verfahren der Felduntersuchung (z. B. Kegeldurchdringungsprüfungen, Feldversuche mit Flügelsonde und Beobachtungen des Porenwasserdrucks in verschiedenen Tiefen), in Kombination mit einer Probenahme für die Laboranalyse, bestimmt. Die tiefenbezogene Verteilung des Porenwasserdrucks stellt die Grundlage der Bewertung der tiefenbezogenen Verteilung des wirksamen geostatischen Drucks dar. Diese Angabe ist erforderlich, um zu bestimmen, ob der Boden überkonsolidiert oder normal konsolidiert ist. Dennoch muss berücksichtigt werden, dass der Porenwasserdruck mit der Jahreszeit und dem Niederschlag wesentlich schwanken kann. Ein zeitweiliger hoher Porenwasserdruck, der den Umfang des wirksamen geostatischen Drucks verringert, kann fälschlicherweise den Eindruck eines überkonsolidierten Bodens erwecken.

Die Prüfung sollte nach EN 1997-2 erfolgen. Die Identifizierung und Klassifizierung des Bodens, die auf den Ergebnissen der Bodenuntersuchung beruht, muss EN ISO 14688 entsprechen.

Der Eindringwiderstand des Bodens sollte untersucht werden, um auswahlbezogene Angaben hinsichtlich der Eignung der Einbauanlagen zu gewinnen.

B.3.2 Laboruntersuchungen

Die Konsolidations- und Setzungsparameter werden herkömmlicherweise mit Hilfe von Ödometerprüfungen an ungestörten Bodenproben bestimmt, die unter Anwendung von Kolbenprobenehmern mit hoher Qualität entnommen werden. Die Ergebnisse herkömmlicher Ödometerprüfungen führen zu Werten des Kompressionsmoduls, des Vorkonsolidationsdrucks und des Konsolidationsbeiwertes bei vertikalem Porenwasserfluss. Für die Bestimmung des Konsolidationsbeiwertes bei horizontalem Porenwasserfluss in Ödometerprüfungen ist die radiale Dränung zu berücksichtigen.

Die Laborprüfungen schließen auch die Bestimmung der undränierten Scherfestigkeit und der Empfindlichkeit des Bodens sowie der Masse pro Volumeneinheit und des Wassergehaltes sowie die Indexprüfung ein.

B.3.3 Felduntersuchungen

Felduntersuchungen umfassen üblicherweise die Bestimmung der undränierten Scherfestigkeit mit Hilfe von Feldversuchen mit Flügelsonde und/oder Kegeleindringungsprüfungen. Der Konsolidationsbeiwert und die Durchlässigkeit bei horizontalem Porenwasserfluss kann durch Anwendung von Kegeleindringungsprüfungen mit einem Porenwasserdruck-Messgerät (CPTU) bewertet werden. Dies erfolgt durch intermittierende Lotung in Kombination mit einer Untersuchung des Ausgleichs des Porenwasserüberdrucks, der durch die Lotung erfolgt [50], [51], [49], [33].

Eine mögliche Kontamination des Porenwassers kann durch Probenahme aus dem Porenwasser in verschiedenen Tiefen untersucht werden [44].

B.4 Aspekte der Bemessung

B.4.1 Setzung

B.4.1.1 Gesamtsetzung

Die auf die durch den Belastungsvorgang hervorgerufene Verformung des Bodens bezogene Bemessung muss EN 1997-1 entsprechen.

Die Frage, ob der Boden normal konsolidiert oder überkonsolidiert ist, hat große Bedeutung für die Korrektheit der Setzungsanalyse und für die Frage, ob die Anwendung der vertikalen Dränung ausreichend ist oder nicht. Eine ordnungsgemäße Bestimmung des Vorkonsolidationsdrucks ist von größter Wichtigkeit. Die Anwendung von Vertikaldräns in Fällen, in denen die durch den Belastungsvorgang hervorgerufenen wirksamen Spannungen unterhalb des Vorkonsolidationsdrucks des Bodens liegen, ist kontraproduktiv, da der Einbau der Dräns zu Störungen führen kann, die eine Verstärkung der Setzung hervorrufen. Daher sollte die vertikale Dränung nur in Fällen angewendet werden, in denen der Vorkonsolidationsdruck unterhalb der durch den Belastungsvorgang hervorgerufenen Spannungen liegt.

Die durch die externe Belastung verursachten Verformungen des Bodens umfassen sowohl vertikale als auch horizontale Verdrängungen, deren relatives Ausmaß von den Belastungsbedingungen, der Scherfestigkeit des Bodens und dem Verhältnis zwischen Breite des belasteten Bereichs und Tiefe der Bodenschicht abhängt. Insbesondere in den Fällen, in denen Prüfgebiete als Grundlage der Bemessung angewendet werden, deren Breite im Vergleich zur Tiefe der Bodenschicht gering ist, können horizontale Verdrängungen maßgeblich zur beobachteten vertikalen Setzung beitragen. In derartigen Fällen liefern vertikale Neigungsmessgeräte, die entlang der Grenzen der Prüfgebiete angeordnet werden, Informationen zum Einfluss der horizontalen Verformungen auf die vertikale Setzung.

Bei der Analyse der nach der abgeschlossenen Konsolidation erreichten Gesamtsetzung sollte der Einfluss möglicher Störungen durch den Dräneinbau auf die Bodenverformungseigenschaften berücksichtigt werden. Die Auswirkungen der Störungen hängen in großem Umfang vom Verfahren des Dräneinbaus, von Größe und Form des Dorns und von den strukturellen Merkmalen und der undrännierten Scherfestigkeit des Bodens ab. Um die Genauigkeit der Setzungsanalyse sicherzustellen, ist es wichtig, dass die mittlere Wichte jeglicher für die Belastung verwendeter Schüttungsmaterialien in der Spezifikation angegeben wird. Auch ist es erforderlich, die durch den Auftrieb verursachte Verringerung der Belastung für den Fall zu berücksichtigen, dass ein Teil der Auflast im Verlaufe des Konsolidationsprozesses unterdrückt wird.

Die gesamte Primärkonsolidationssetzung kann mit Hilfe der sich im Verlaufe des Konsolidationsprozesses schrittweise entwickelnden Setzung abgeschätzt werden. Zum Beispiel kann nach Asaoka [1], [2] das zwischen den in gleichen Zeitabständen Δt beobachteten Setzungen festgestellte Verhältnis zum Bewerten der sich am Ende ergebenden Primärkonsolidationssetzung verwendet werden.

Die Wirksamkeit des Abdichtungssystems ist maßgeblich für die durch die Anwendung des Vakuumverfahrens erreichte Setzung (siehe Anhang A). Üblicherweise kann maximal ein Vakuum von 70 % bis 80 % erreicht werden, was zu einem Anstieg der wirksamen Spannung um 70 kPa bis 80 kPa führt. Das Verhältnis des Anstiegs der wirksamen vertikalen Spannung zum Anstieg der wirksamen horizontalen Spannung unterscheidet sich von dem Verhältnis, das bei externer Belastung erreicht wird. Als Folge daraus unterscheidet sich auch der während des Konsolidationsprozesses auftretende Anstieg der Scherfestigkeit von dem bei externer Belastung erreichten Anstieg.

Eine temporäre Überbelastung kann die der Periode der Primärkonsolidation folgende sekundäre Kriechsetzung verkürzen. Das erforderliche Ausmaß dieser temporären Überbelastung hängt von den Verformungsmerkmalen des Bodens und den Anforderungen an die Sekundärkonsolidationssetzung ab. Üblicherweise ist eine temporäre Überbelastung, die mindestens das 0,25fache bis 0,35fache der ständigen Bemessungslast beträgt und bis zum Abschluss der Primärkonsolidation beibehalten wird, ausreichend, um die Kriechsetzung wesentlich herabzusetzen, nachdem die temporäre Last wieder entfernt wird [14], [20].

B.4.1.2 Geschwindigkeit der Konsolidationssetzung

Bemessungsannahmen

Für die Analyse der Geschwindigkeit der Konsolidationssetzung müssen die Dränungsmerkmale (Durchmesser D des durch jeden Drän entwässerten gedachten Bodenzylinders, Drändurchmesser d_w , Durchmesser der gestörten Zone d_s , Durchflusskapazität q_w) sowie die Parameter der Bodenkonsolidation (Konsolidationsbeiwert c_h , Durchlässigkeit bei horizontalem Porenwasserfluss in ungestörtem Boden k_h und in der gestörten Zone k_s) identifiziert werden, siehe Bild B.2.

Wie aus Bild B.2 zu entnehmen ist, hängt der Wert von D vom Dräneinbauraster ab (das 1,05fache des Dränabstandes der in einem gleichseitigen Dreiecksraster angeordneten Dräns bzw. das 1,13fache des Dränabstandes der in einem quadratischen Raster angeordneten Dräns). Der Drändurchmesser d_w eines Streifen-dräns kann als entsprechend dem Drändurchmesser eines zylindrischen Dräns mit demselben Umfang wie beim Streifen-drän angesehen werden, d. h. $d_w = 2(b + t)/\pi$, wobei b die Breite und t die Dicke des Streifen-dräns ist [17]⁵⁾.

Die Konsolidationsparameter des Bodens beruhen im Allgemeinen auf den Ergebnissen der Ödometerprüfungen, bei denen der Ausgleich des Porenwasserüberdrucks in vertikaler Richtung erfolgt. Dies unterscheidet sich von der Realität mit Vertikaldräns, bei denen der Ausgleich des Porenwasserüberdrucks überwiegend in horizontaler Richtung stattfindet. Der Unterschied zwischen der Ödometerprüfung und der Realität bekommt eine Bedeutung, wenn Nähte oder Schichten vorliegen, deren Durchlässigkeit über der des Hauptbodenkörpers liegt. Für die Bestimmung des Konsolidationsbeiwertes bei horizontalem Porenwasserfluss können Ödometerprüfungen in Kombination mit Radialdränung oder CPTU-Prüfungen nach B.3.3 angewendet werden.

5) Entsprechend [45] sollte der Wert für den äquivalenten Durchmesser $d_{w, eq} = (b + t)/2$ betragen.

Bemessungsverfahren

Theoretisch wird, unabhängig vom Dränraster, davon ausgegangen, dass jeder Drän einen gedachten Bodenzylinder entwässert, dessen Querschnittsfläche der Querschnittsfläche entspricht, die durch vier nebeneinander liegende Dräns entwässert wird, siehe Bild B.2. Die wirksamste Weise, die Kapazität der Vertikaldräns für die Beschleunigung des Konsolidationsprozesses zu nutzen, besteht darin, die Dräns im Muster eines gleichseitigen Dreiecks einzubauen. Der Konsolidationsprozess wird hauptsächlich durch den Porenwasserfluss in radialer Richtung auf den Drän zu und in geringerem Maße durch den Porenwasserfluss in vertikaler Richtung zwischen den Dräns bestimmt. Es bestehen zwei Bemessungsverfahren, die so genannte „Bemessung mit freien Spannungen“ und die so genannte „Bemessung mit gleichen Spannungen“. Wie durch Barron [3] dargestellt, ist die Differenz zwischen den bei den beiden Verfahren erhaltenen Ergebnissen zum mittleren Konsolidationsprozess vernachlässigbar. Daher ist wegen ihrer Einfachheit die „Bemessung mit gleichen Spannungen“, Gleichung (1), zum Routineverfahren geworden [18], [28], [32], [35], [52].

Bei den für die Bestimmung des Einflusses des Brunnenwiderstandes (begrenzte Durchflusskapazität) angewendeten Bemessungsverfahren wird für die Konsolidationsmerkmale des Bodens im Allgemeinen davon ausgegangen, dass sie über die gesamte Bodenschicht konstant sind. Der Einfluss von Schichten mit unterschiedlichen Konsolidationsmerkmalen wurde von Onoue [41] analysiert.

Eine weitere herkömmliche Annahme bei der Bemessung ist die Gültigkeit des Darcy'schen Gesetzes. Die Erfahrungen mit einer Reihe von Feldversuchen ([16], [21] und [46]) und mit Laborprüfungen zur Durchlässigkeit ([16] und [13]) haben gezeigt, dass bei einem geringen hydraulischen Gefälle eine Abweichung vom Darcy'schen Gesetz besteht. Es wurden Konsolidationsgleichungen entwickelt, die sowohl für den Darcy'schen als auch den nicht Darcy'schen Durchfluss gelten [22].

Die bei der Routinebemessung der meisten Vertikaldränungsprojekte angewendete Grundtheorie der vertikalen Dränung wurde von Hansbo [18] als eine Erweiterung der Theorie von Barron [3] für den Fall von Dräns mit begrenzter Durchflusskapazität veröffentlicht. Demnach folgt die Konsolidationsgeschwindigkeit folgender mathematischer Beziehung:

$$\bar{U}_h = 1 - \exp\left(\frac{8c_h t}{\mu D^2}\right)$$

wobei bei Vernachlässigung unwesentlicher Terme Folgendes gilt:

$$\mu = \frac{D^2}{D^2 - d_w^2} \left[\ln\left(\frac{D}{d_s}\right) + \frac{k_h}{k_s} \ln\left(\frac{d_s}{d_w}\right) - \frac{3}{4} \right] + \frac{k_h}{q_w} \pi z [2l - z]$$

Ein wichtiger Parameter bei der Bemessung von Vertikaldräns ist die Durchflusskapazität der Dräns q_w , d. h., die Menge an Wasser, die je Zeiteinheit in vertikaler Richtung und bei einem hydraulischen Gefälle von 1 durch den Drän fließen kann. (In EN 10318 entspricht die Durchflusskapazität der Transmissivität, multipliziert mit der Dränbreite.) Es sind Dräns auf den Markt gelangt, die eine unzureichende Durchflusskapazität aufwiesen, wenn sie in großer Tiefe eingebaut wurden. Weisen die Dräns eine unzureichende Durchflusskapazität auf, verringert sich der Grad der durch Dräneinbau in homogenen Böden erreichten Konsolidation mit der Einbautiefe.

Das Verhältnis der Konsolidationszeit t unter Berücksichtigung der Auswirkung des Brunnenwiderstandes (begrenzte Durchflusskapazität) zur Konsolidationszeit t_1 bei Vernachlässigung der Auswirkung des Brunnenwiderstandes kann durch die Gleichung $t = t_1 \times (1 + \Delta t)$ ausgedrückt werden, wobei für die zeitliche Verzögerung Δt der Konsolidation folgende Gleichung gilt:

$$\Delta t = \frac{\pi z (2l - z) k_h (D^2 - d_w^2)}{q_w D^2 \left[\ln(D/d_s) + (k_h/k_s) \ln(d_s/d_w) - 3/4 \right]}$$

Der ungünstigste Fall bezüglich der Anforderungen an die Durchflusskapazität wird erhalten, wenn $k_s = k_h$, wodurch sich ergibt:

$$\Delta t = \frac{\pi z(2l - z)k_h(D^2 - d_w^2)}{q_w D^2 [\ln(D/d_w) - 3/4]}$$

Die mittlere Verzögerung Δt der Konsolidation ändert sich auf zwei Drittel des in der Tiefe $z = l$ erhaltenen Wertes.

Die Auswirkung des Brunnenwiderstands (Durchflusskapazität) hängt von der Tiefe des Dräneinbaus, vom Abstand zwischen den Dräns und davon ab, ob die Dräns durchdringend sind oder nicht, siehe Bild B.3. In dem in Bild B.3 dargestellten Fall ergibt sich für die Verzögerung Δt bei 30 m Tiefe ein Wert von 1,46 (146 %) und für den Mittelwert Δt von 0,97.

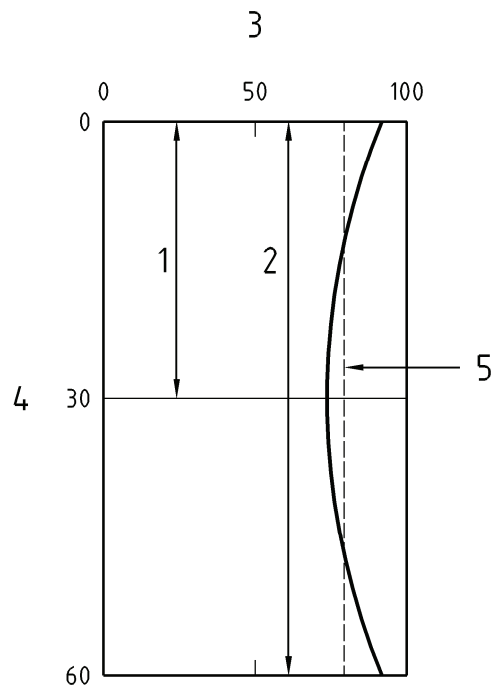
Unter der Voraussetzung, dass ein durch den Brunnenwiderstand an der Spitze von teilweise durchdringenden Dräns ($z = l$, Bilder B.2 und B.3) hervorgerufener Anstieg in der Konsolidationszeit von 10 % im Verhältnis zu der Zeit bei vollständig wirksamen Dräns zulässig ist, wird in Bild B.4 ein Beispiel der herkömmlichen Abschätzung der in Bezug auf die Durchlässigkeit des Bodens und die Einbautiefe erforderlichen Durchflusskapazität dargestellt. Bei durchdringenden Dräns (wirksame Dränung an der Spitze und am Boden) findet die Verzögerung der Konsolidation in mittlerer Tiefe statt, siehe Bild B.3, somit werden die tiefenbezogenen Werte in Bild B.4 verdoppelt. Der Abstand zwischen den Dräns in Bild B.4 wird mit 0,9 m angenommen (Dräns im Muster eines gleichseitigen Dreiecks angeordnet, d. h. $D = 0,945$ m, siehe Bild B.3), und der äquivalente Drändurchmesser wird mit $d_w = 0,065$ m angenommen.

Die nach Bild B.4 erforderliche Durchflusskapazität für teilweise durchdringende Dräns, die in einer Tiefe von 15 m in schluffigem Ton mit einer Durchlässigkeit von 0,25 m/a ($0,08 \times 10^{-8}$ m/s) eingebaut werden, ergibt sich zu 1 000 m³/a, wogegen die erforderliche Durchflusskapazität für teilweise durchdringende Dräns, die in einer Tiefe von 15 m in Ton mit einer Durchlässigkeit von 0,03 m/a ($0,095 \times 10^{-9}$ m/s) eingebaut werden, 110 m³/a beträgt.

Die Anforderungen an die Durchflusskapazität nehmen mit steigendem Abstand zwischen den Dräns ab. So beträgt beispielsweise bei einem Abstand zwischen den Streifendräns von 1,5 m ($D = 1,575$ m) und 2 m ($D = 2,1$ m) die erforderliche Durchflusskapazität 80 % bzw. 70 % der in Bild B.4 dargestellten.

Wird die zulässige Verzögerung der Konsolidation auf 5 % verringert, verdoppelt sich die in Bild B.4 angegebene erforderliche Durchflusskapazität.

Für durchdringende Dräns beziehen sich die Werte für die Tiefe l in Bild B.4 auf die halbe Tiefe des Dräneinbaus, siehe Bilder B.2 und B.3.



Legende

- 1 teilweise durchdringender Drän ($l = 30$ m)
- 2 durchdringender Drän ($2l = 60$ m)
- 3 Konsolidationsgrad \bar{U}_h %
- 4 Tiefe des Dräneinbaus, in m
- 5 \bar{U}_h , Mittelwert

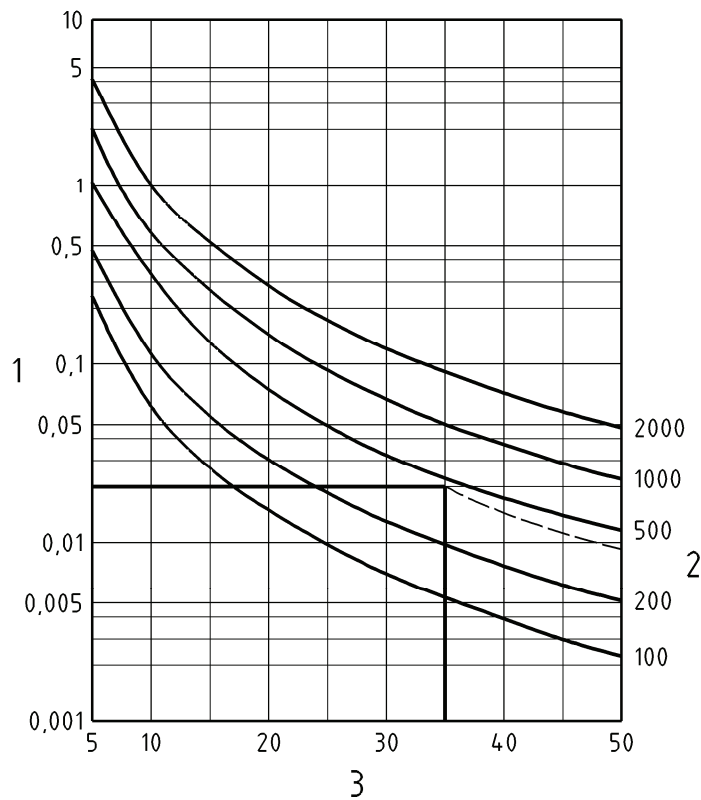
Konsolidationsparameter: $q_w = 100 \text{ m}^3/\text{a}$ ($\approx 3,2 \text{ cm}^3/\text{s}$), $c_h = 1,0 \text{ m}^2/\text{a}$ ($\approx 3,2 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$), $k_s = k_h = 0,1 \text{ m/a}$ ($\approx 3,2 \times 10^{-9} \text{ m/s}$), Konsolidationszeit $t = 0,5$ a.

Abstand zwischen den Dräns von 0,9 m (Muster eines gleichseitigen Dreiecks; $D = 0,945$ m), Drändurchmesser $d_w = 0,065$ m.

Bild B.3 — Beispiel für den Einfluss des Brunnenwiderstandes auf den Konsolidationsgrad bei teilweise durchdringenden und durchdringenden Dräns, die bis zu einer Tiefe von 30 m bzw. 60 m eingebaut wurden

Mit der Zeit kann eine bestimmte Qualitätsabnahme des Filters erwartet werden, die durch bakteriologische Aktivität oder Pilzbefall verursacht wird (siehe Anhang A, Bild A.10). Die Qualitätsabnahme verringert die Durchflusskapazität im Allgemeinen gegen Ende des Konsolidationsprozesses. Aus diesem Grund hat sie einen relativ geringen Einfluss auf die Geschwindigkeit der Konsolidation.

Bei stark komprimierbaren Böden kann die während des Konsolidationsprozesses auftretende relative Kompression zu Ausknicken und Kräuseln der Dräns führen (siehe Anhang A, Bild A.5), was die Durchflusskapazität bestimmter Dräntypen bedeutend verringern kann [31].



Legende

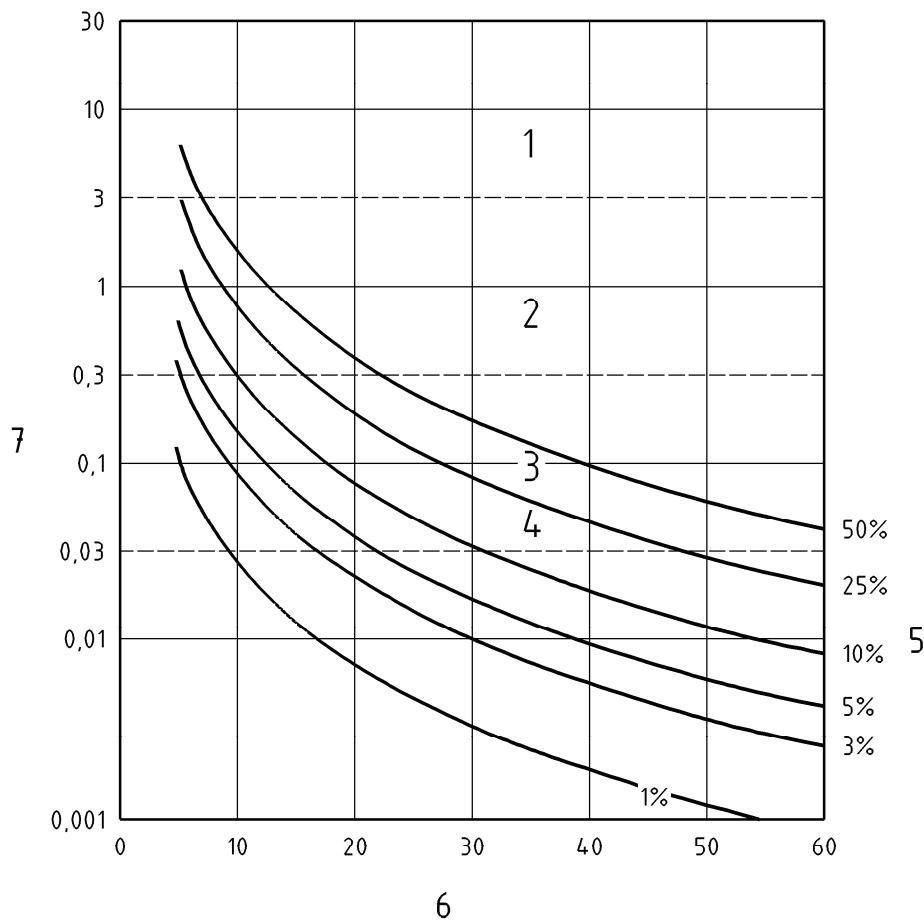
- 1 Durchlässigkeit ($k_s = k_h$), m/a ($1 \text{ m/a} = 3,17 \times 10^{-8} \text{ m/s}$)
- 2 q_w , m³/a
- 3 Einbautiefe, in m

Abstand zwischen den Dräns (Muster eines gleichseitigen Dreiecks; $D = 0,945 \text{ m}$), Drändurchmesser $d_w = 0,065 \text{ m}$.

Bild B.4 — Anforderungen an die Durchflusskapazität q_w in Bezug auf den Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens bei einer Verlängerung der Konsolidationszeit um 10 % bei einer Dräneinbautiefe l (siehe Bilder B.2 und B.3)

Tabelle B.1 — Beispiele der Mindestdurchflusskapazitäten nach Analyse der Konsolidation

Werte der Durchflusskapazität q_w in m ³ /a für eine Konsolidationsverzögerung von $\Delta t = 10 \%$ bei der Tiefe $z = l$									
Bodendurchlässigkeit	$D/d_w = 10$ (Streifendräns)			$D/d_w = 15$ (Streifendräns)			$D/d_w = 5$ (Sanddräns)		
	$l = 10 \text{ m}$	$l = 20 \text{ m}$	$l = 30 \text{ m}$	$l = 10 \text{ m}$	$l = 20 \text{ m}$	$l = 30 \text{ m}$	$l = 10 \text{ m}$	$l = 20 \text{ m}$	$l = 30 \text{ m}$
$k_s = k_h = 0,315 \text{ m/a}$ (10^{-8} m/s)	630 m ³ /a	2 525 m ³ /a	5 690 m ³ /a	505 m ³ /a	2 010 m ³ /a	4 530 m ³ /a	1 105 m ³ /a	4 420 m ³ /a	9 950 m ³ /a
$k_s = k_h = 0,0315 \text{ m/a}$	63 m ³ /a	253 m ³ /a	569 m ³ /a	50 m ³ /a	201 m ³ /a	453 m ³ /a	110 m ³ /a	442 m ³ /a	995 m ³ /a



Legende

- | | |
|----------------|--------------------------------|
| 1 Torf | 5 Verzögerung |
| 2 Torf/Schluff | 6 Tiefe l des Dräneinbaus, m |
| 3 Schluff/Ton | 7 Durchlässigkeit, m/a |
| 4 Ton | |

Abstand zwischen den Dräns 0,9 m (Muster eines gleichseitigen Dreiecks; $D = 0,945$ m), Drändurchmesser $d_w = 0,065$ m, $k_s = k_n$.

Bild B.5 — Verzögerung bei der Konsolidation in einer Tiefe l des Dräneinbaus (siehe Bilder B.2 und B.3) bei Dräns mit einer Durchflusskapazität von $500 \text{ m}^3/\text{a}$ ($16 \text{ cm}^3/\text{s}$)

B.4.1.3 Sicherheitsbeiwerte für vorgefertigte Streifendräns

In Bezug auf mögliche negative Auswirkungen auf die Durchflusskapazität von vorgefertigten Streifendräns ist der Einfluss des wirksamen seitlichen Bodendrucks gegen die Dräns, der Bodentemperatur und der biologischen und chemischen Langzeit-Wirkungen zu berücksichtigen. Um die Wirksamkeit der Dräns sicherzustellen, sollte die Prüfung der Durchflusskapazität der Dräns (siehe Anhang A) unter angemessener Beachtung des erwarteten maximalen wirksamen Seitendrucks gegen die Dräns und der Temperaturbedingungen beim tatsächlichen ausgeführten Projekt, multipliziert mit bestimmten geforderten Sicherheitsbeiwerten [36], ausgeführt werden. Die Durchführung ist in Anhang A beispielhaft dargestellt.

B.4.2 Stabilität/Standsicherheit

Der Nachweis der Stabilität-/Standsicherheit ist von großer Wichtigkeit, wenn die Bodenverbesserung mit Hilfe von vertikalem Dräeinbau und Vorbelastung vorgenommen wird. Beim Nachweis der Stabilität/Stand-sicherheit der auf die Bodenoberfläche aufgetragenen Dammbelastung wird die von den Vertikaldräns (z. B. Sanddräns) selbst verursachte Bewehrungswirkung nicht berücksichtigt. Die Abschätzung und eine Weiterverfolgung (Nachuntersuchung) der während der Konsolidation erzeugten Festigkeitserhöhung, insbesondere bei schrittweiser Belastung, stellen jedoch einen wichtigen Teil des Nachweises dar.

Die undränierete Scherfestigkeit, die durch Feldversuche (z. B. Feldversuche mit Flügelsonde oder Kegeleindringungsprüfungen) oder durch Laborversuche (z. B. Kegelfallprüfung, Triaxialversuch oder unbehinderter Druckversuch) bestimmt wurde, sollte in Bezug auf die Konsistenzgrenzen des Bodens nach Atterberg und die Scherrichtung angepasst werden [7]. Ist die Aufbringung der externen Belastung mit Stabili-täts-/Standsicherheitsproblemen verbunden, ist die Last schrittweise aufzubringen. Nach jedem Belastungs-schritt ist die während des Konsolidationsprozesses erreichte Zunahme der Scherfestigkeit zu untersuchen, bevor der nächste Belastungsschritt vorgenommen wird, sodass die Stabilität/Standsicherheit nicht gefährdet wird.

Eine Möglichkeit, die Zunahme der Festigkeit nach jedem Belastungsschritt abzuschätzen, besteht darin, empirische Korrelationen anzuwenden, z. B. die zwischen Fließgrenze, undränkter Scherfestigkeit und Vorkonsolidationsdruck [15] oder die zwischen Plastizitätsindex, undränkter Scherfestigkeit und Vorkonsolidationsdruck [48]. Findet während des Konsolidationsprozesses keine Änderung der Fließgrenze oder des Plastizitätsindex statt, kann die relative Änderung der undränkten Scherfestigkeit als gleichwertig mit der relativen Änderung des Vorkonsolidationsdrucks angenommen werden. Wertvolle empirische Korre-lationen zur Abschätzung der Festigkeitszunahme wurden auch von Mesri [38] und Ladd [30] vorgeschlagen. Da der Vorkonsolidationsdruck mit dem Anstieg der wirksamen Spannung im Boden zunimmt, hängt er direkt vom Konsolidationsgrad ab, wodurch sowohl die Verringerung der Setzung als auch die Abnahme des Porenwasserüberdrucks charakterisiert wird. Aus diesem Grund sollte die Porendruck-Überwachung Teil der Vorschriften für Vertikaldränungsprojekte sein, wie in Anhang A beschrieben.

Probleme mit der Stabilität/Standsicherheit können vermieden werden, indem die externe Belastung durch das Vakuumverfahren oder durch ein Abpumpen des Wassers aus dem unterliegenden durchlässigen Boden ersetzt wird (siehe Anhang A). Üblicherweise kann ein 70%iges Vakuum erreicht werden, was zu einer Zunahme der wirksamen Spannung führt, die der durch eine Flächenbelastung von 70 kN/m^2 erreichten entspricht. Das Verhältnis zwischen Zunahme der wirksamen vertikalen und der Zunahme der wirksamen horizontalen Spannung unterscheidet sich jedoch in den beiden Fällen. Dies führt zu unterschiedlichen Auswirkungen auf die durch die Konsolidation verursachte Zunahme der undränkten Scherfestigkeit im Vergleich zu der durch die Flächenbelastung verursachten Zunahme dieser Festigkeit. Wird bei Einbauten in Küstennähe das Vakuumverfahren angewendet, schließt die sich ergebende Zunahme der wirksamen Spannung auch den geostatischen Druck des Meeresswassers ein.

Anhang C (informativ)

Verbindlichkeitsgrad der Spezifikationen

Die Bestimmungen sind entsprechend ihres Verbindlichkeitsgrades gekennzeichnet:

- (REQ): Anforderung;
- (REC): Empfehlung;
- (PER): Genehmigung;
- (ST): Angabe.

4.1	(REQ)	6.3.2.2	(REC)	6.3.9.2	(ST)	6.4.8	(REC)	8.3.3	(REC)
4.2	(REQ)	6.3.3.1	(REQ)	6.3.9.3	(REC)	6.4.9	(ST)	8.3.4	(REQ)
4.3	(REQ)	6.3.3.2	(REC)	6.3.9.4	(REC)	6.4.10	(REQ)	8.3.5	(REQ)
4.4	(REQ)	6.3.3.3	(REQ)	6.3.10.1	(REQ)	6.5.1	(ST)	8.3.6	(REQ)
4.5	(REQ)	6.3.4.1	(REQ)	6.3.10.2	(REQ)	6.5.2	(REC)	8.3.7	(REC)
4.6	(REQ)	6.3.4.2	(REC)	6.4.1.1	(ST)	6.5.3	(REC)	8.3.8	(REC)
5.1.1	(REQ)	6.3.4.3	(REC)	6.4.1.2	(REQ)	6.5.4	(REQ)	8.3.9	(REQ)
5.1.2	(REQ)	6.3.4.4	(REQ)	6.4.2.1	(REC)	7.1.1	(ST)	8.4.1	(REC)
5.1.3	(REC)	6.3.5.1	(ST)	6.4.3.1	(REQ)	7.1.2	(REC)	8.4.2	(REQ)
5.2.1	(REQ)	6.3.5.2	(ST)	6.4.3.2	(REC)	7.1.3	(ST)	8.4.3	(REC)
5.2.2	(REQ)	6.3.5.3	(REQ)	6.4.3.3	(REQ)	7.1.4	(REC)	8.4.4	(REQ)
5.2.3	(REC)	6.3.5.4	(REC)	6.4.4.1	(REQ)	8.1.1	(REQ)	8.4.5	(REQ)
6.1.1	(ST)	6.3.5.5	(REC)	6.4.4.2	(REC)	8.1.2	(REQ)	9.1.1	(REQ)
6.1.2	(REQ)	6.3.5.6	(REC)	6.4.4.3	(REQ)	8.1.3	(REQ)	9.1.2	(REQ)
6.2.1	(ST)	6.3.5.7	(REC)	6.4.5.1	(ST)	8.1.4	(REC)	9.1.3	(REQ)
6.2.2	(ST)	6.3.6.1	(REC)	6.4.5.2	(REQ)	8.2.1	(REQ)	9.1.4	(REC)
6.2.3	(PER)	6.3.6.2	(REC)	6.4.5.3	(REQ)	8.2.2	(REQ)	9.1.5	(REQ)
6.2.4	(REQ)	6.3.6.3	(REQ)	6.4.6.1	(REC)	8.2.3	(REC)	9.2.1	(REQ)
6.2.5	(ST)	6.3.6.4	(REQ)	6.4.6.2	(REC)	8.2.4	(REC)	9.2.2	(REC)
6.3.1.1	(ST)	6.3.7.1	(REQ)	6.4.6.3	(REQ)	8.2.5	(REC)	9.2.3	(REQ)
6.3.1.2	(REC)	6.3.7.2	(REC)	6.4.6.4	(REQ)	8.2.6	(REC)	9.2.4	(REQ)
6.3.1.3	(REQ)	6.3.8.1	(REC)	6.4.7.1	(REQ)	8.3.1	(REQ)	9.2.5	(REC)
6.3.2.1	(REC)	6.3.9.1	(REQ)	6.4.7.2	(REC)	8.3.2	(REQ)	9.2.6	(REQ)

Die Bestimmungen sind entsprechend ihres Verbindlichkeitsgrades gekennzeichnet:

- (REQ): Anforderung;
- (REC): Empfehlung;
- (PER): Genehmigung;
- (ST): Angabe.

9.2.7	(REC)	11.1.1	(ST)	11.2.2	(REC)	11.3.1	(REQ)
9.2.8	(REC)	11.1.2	(REQ)	11.2.3	(REQ)	11.3.2	(REQ)
9.2.9	(REC)	11.1.3	(REQ)	11.2.4	(REC)	11.3.3	(REQ)
10.1	(REQ)	11.2.1	(REQ)	11.2.5	(REC)	11.4	(REC)
10.2	(REQ)						

Literaturhinweise

- [1] Asaoka, A. (1978). Observational procedure of settlement prediction, *Soils and Foundations*, Bd. 18, Nr. 4, S. 87–101
- [2] Asaoka, A. and Matsuo, M. (1980). An Inverse problem approach to settlement prediction, *Soils and Foundations*, Bd. 20, Nr. 4, S. 53–66
- [3] Barron, R. A. (1948). Consolidation of fine-grained soils by drain wells. *Sitzungsberichte ASCE*, 134, Aufsatz Nr. 2 346, S. 718–742
- [4] Bergado, D. T., Akasami, H., Alfaro, M. & Balsubramaniam, A. S. (1992). Smear effects of vertical drains on soft Bangkok clay. *J. Geot. Eng.* 117, Nr. 10, S. 1509–1530
- [5] Bergado, D. T., Balasubramaniam, A. S., Patawaran, M. A. B. & Kwuenpreuk, W. (2000). Electro-osmotic consolidation of soft Bangkok clay with prefabricated vertical drains. *Ground Improvement*, 4, S. 153–163
- [6] Bodamèr, R. M. (2003). Test report discharge capacity Mebradrain type MT 88 HD for Escravos, Nigeria. *Geotechnics Holland b.v. Zuider IJdijk 58*. Amsterdam
- [7] Bjerrum, L. (1973). Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils (collapsible, expansive and others). *Sitzungsberichte 8th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Moskau, Bd. 3. State-of-the-art Report
- [8] Chai, J. C., Miura, N. & Sakajo, S. (1997). A theoretical study on smear effect around vertical drain. *Sitzungsberichte 14th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Hamburg, Bd. 3, S. 1581–1584
- [9] Chaumeny, J.-L., Liausu, P. & Varaksin, S. (1997). *Consolidation atmosphérique de boue de drainage dans le port de Lübeck*. Proc. 14th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng, Hamburg, Bd. 3, S. 1969–1972
- [10] Cognon, J.-M. (1991). *La consolidation atmosphérique*. *Révue Française Géotechnique*, Nr. 57, S. 37–47
- [11] Cortlever, N. & Hansbo, S. (2004). Aspects of vertical drain quality and action, *Sitzungsberichte 3rd European Geosynthetic Conference*, München
- [12] CROW (1993). Vertical Drainage. *Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeerstechniek, Publ. 77*
- [13] Dubin, B & Moulin, G. (1986). Influence of critical gradient on the consolidation of clay. In *Consolidation of soils: testing and evaluation*, *ASTM STP 892*, S. 354–377, American Society for Testing and Materials
- [14] Eriksson, U., Hansbo, S. & Torstensson, B.-A. (2000). Soil improvement at Stockholm-Arlanda Airport. *Ground Improvement* 4, S. 73–80
- [15] Hansbo, S. (1957). *A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test*. Swedish Geotechnical Institute, *Sitzungsberichte* Nr. 14
- [16] Hansbo, S. (1960). *Consolidation of clay, with special reference to influence of vertical drains*. Swedish Geotechnical Institute, *Sitzungsberichte* Nr. 18. Dissertation, Chalmers Un. of Technology
- [17] Hansbo, S. (1979). Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drains. *Ground Engineering*, Bd. 12, Nr. 5, S. 16–25

- [18] Hansbo, S. (1981). Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains. *Sitzungsberichte 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Stockholm, Bd. 3, Aufsatz 12/22, S. 677–682
- [19] Hansbo, S. (1983). Discussion, Proc. 8th European Conf. Soil Mech. Found. Eng., Helsinki, Bd. 3, Spec. Session 2, S. 1148–1149
- [20] Hansbo, S. (1987). Fact and fiction in the field of vertical drainage. *Prediction and Performance in Geotechnical Engineering*, Calgary, S. 61–72
- [21] Hansbo, S. (1997). Aspects of vertical drain design: Darcian or non-Darcian flow. *Géotechnique* 47, Nr. 5, S. 983–992
- [22] Hansbo, S. (2001). Consolidation equation valid for both Darcian and non-Darcian flow. *Géotechnique* 51, Nr. 1, S. 51–54
- [23] Hird, C. C. & Moseley, V. J. (2000). Model study of seepage in smear zones around vertical drains in layered soil. *Geotechnique* 50, Nr. 1, S.89–97
- [24] Jamiolkowski, M., Lancelotta, R. & Wolski, W. (1983). Summary of discussion. *Proc. 8th European Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Helsinki, Bd. 3, Spec. Session 6, S. 1242–1245
- [25] Johnson, S. J. (1970). Foundation precompression with vertical sand drains. *Sitzungsberichte ASCE, Journal Soil Mech. Found. Eng.*, SM 1, S. 145–175
- [26] Kamon, M. (1984). Function of band-shaped prefabricated plastic board drain. *Proc. 19th Japanese National Conf. on Soil Mech. Found. Eng*
- [27] Karunaratne, G. P., Chew, S. H., Lim, L. H., Toh, M. L. Poh, W. G. & Hee, A. M. (2002). Electro-osmotic consolidation of soft clay with conductive polymeric vertical drain. *7th Int. Geosynthetics Conf.*, 3, Nice, S. 1043–1046.
- [28] Kjellman, W. (1948). Consoliation of fine-grained soils by drain wells. *Trans. ASCE*, Bd. 113 (Contribution to the discussion), S. 748–751
- [29] Koda, E., Szymanski, A. & Wolski, W. (1986). Laboratory tests on Geodrains— Durability in organic soils. *Seminar on Laboratory Testing of Prefabricated Band-Shaped Drains*. Milan, April 22–23.
- [30] Ladd, C. C. (1991). Stability evaluation during staged construction. *J. Geot. Eng.* 117, Nr. 4, S. 540–615
- [31] Lawrence, C. A. & Koerner, R. M. (1988). *Flow behavior of kinked strip drains*. In Geosynthetics for Soil Improvement, Geotechnical Special Publication Nr. 18 (editor R. D. Holtz), S. 22–39
- [32] Lo, D. O. K. (1991). Soil improvement by vertical drains. *Doctoral Thesis, Univ. of Illinois at Urbana Champaign*
- [33] Lunne, T., Robertson, P. K. & Powell, J. J. M. (1997). *Cone penetration testing in geotechnical practice*, E & FN Spon, an imprint of Routledge, London
- [34] Madhav, M. R., Park, Y. M. & Miura, N. (1993). Modelling and study of smear zones around band-shaped drains. *Soils and Foundations*, Bd. 33, Nr. 4, S. 133–147
- [35] Magnan, J. P. (1983). *Théorie et Pratique des drains verticeaux*. Lavoisier TEC & DOC
- [36] Massarsch, K. R. (1979). “Lateral Earth Pressure in Normally Consolidated Clay”, *7th European Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Brighton, Proceedings, Bd. 2, S. 245–249
- [37] Massarsch, K. R. & Broms, B. B. (1977). Fracturing of soil caused by driving in clay. *Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Tokyo, Session 1, S. 197–199

- [38] Mesri, G. (1989). A re-evaluation of $s_{u(mob)} = 0,22 \sigma'_p$ using laboratory shear tests. *Canadian Geot. J.* 26, S. 162–164
- [39] Miura N. & Chai, J. C. (2000). Discharge capacity of prefabricated vertical drains confined in clay. *Geosynthetics International*, Bd. 7, Nr. 2, S. 119–134
- [40] Nooy van der Kolff, A. H., Spierenburg, S. E. J., Mathijssen, F. A. J. M. (2003). BeauDrain: A new, innovative consolidation system based on the proven concept of vacuum consolidation, *Proc. Piarc World Road Congress*, Durban
- [41] Onoue, A. (1988). Consolidation of multilayered anisotropic soils by vertical drains with well resistance. *Soils and Foundations*, Japanese Soc. Soil Mech. Found. Eng., Bd. 28, Nr. 3. S. 75–90
- [42] Onoue, A., Ting, N., Germaine, J. T. & Whitman, R. V. (1991). Permeability of disturbed soil around vertical drains. In: *ASCE Geot. Special Publ.*, Nr. 27, S. 879–890.
- [43] Pestana, J.M., Hunt, C. & Goughnour, R. (1998). Use of prefabricated drains for the reduction of liquefaction potential. *ASCE, 12th Engineering Mechanical Conf.*, San Diego, California, S. 1025–1026
- [44] Rixner, J. J., Kraemer, S. R. & Smith, A. D. (1986). Prefabricated vertical drains. *Engineering Guidelines, FWHA/RD-86/168*, Federal Highway Administration, Washington D.C, Bd. 1
- [45] Robertson, P. K., Campanella, R. G., Brown, P. T. & Robinson, K. E. (1988). Prediction of wick drain performance using piezometer cone data. *Can. Geotech. J.* 25, S. 56–61
- [46] Runesson, K., Hansbo, S. & Wiberg, N.–E. (1985). The efficiency of partially penetrating vertical drains. *Géotechnique* 35, Nr. 4, S. 511–516
- [47] Skempton, A. W. (1954). Discussion of the structure of inorganic soil. *Proc. ASCE, Soil Mech. Div.* 80, Separate Nr. 478
- [48] Teh, C. I. & Houlsby, G. T. (1991). An analytical study of the cone penetration test in clay. *Géotechnique* 41, Nr. 1, S. 17–34
- [49] Torstensson, B.-A. (1977). The pore pressure probe. *Fjellsprengningsteknikk/Bergmekanikk/Geoteknikk 1977*, Oslo. S. 34.1–34.15
- [50] Torstensson, B.-A. (1986). A device for in-situ measurement of hydraulic conductivity. *4th International Seminar — Field Instrumentation and In-Situ Measurement*. Nanyang Technological Institute, Singapore
- [51] Yoshikuni, H. & Nakanado, H. (1974). Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability. *Soils and Foundations*, Bd. 14, Nr. 2, S. 35–45
- [52] Zeng, G. X. & Xie, K. H. (1989). New development of the vertical drain theories. *Sitzungsberichte 12th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Rio de Janeiro, Bd. 2, Aufsatz 18/28, S. 1435–1438
- [53] EN 791, *Bohrgeräte — Sicherheit*
- [54] EN 1991 (alle Teile), *Eurocode 1: Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke*
- [55] EN 12224, *Geotextilien und geotextilverwandte Produkte — Bestimmung der Witterungsbeständigkeit*
- [56] EN 12225, *Geotextilien und geotextilverwandte Produkte — Prüfverfahren zur Bestimmung der mikrobiologischen Beständigkeit durch einen Erdeingravingsversuch*
- [57] EN 12226, *Geotextilien und geotextilverwandte Produkte — Allgemeine Prüfverfahren für die Bewertung nach Beständigkeitsprüfungen*

- [58] EN ISO 9863-1, *Geokunststoffe — Bestimmung der Dicke unter festgelegten Drücken — Teil 1: Einzellagen (ISO 9863-1:2005)*
- [59] EN ISO 9864, *Geokunststoffe — Prüfverfahren zur Bestimmung der flächenbezogenen Masse von Geotextilien und geotextilverwandten Produkten (ISO 9864:2005)*
- [60] EN ISO 10318, *Geokunststoffe — Geotextilien, geotextilverwandte Produkte, Dichtungsbahnen und geosynthetische Tondichtungsbahnen — Begriffe und ihre Definitionen (ISO 10318:2005)*
- [61] EN ISO 13438, *Geotextilien und geotextilverwandte Produkte — Auswahlprüfverfahren zur Bestimmung der Oxidationsbeständigkeit (ISO 13438:2004)*
- [62] EN 14030, *Geotextilien und geotextilverwandte Produkte — Auswahlprüfverfahren zur Bestimmung der Beständigkeit gegen Säuren und alkalische Flüssigkeiten (ISO/TR 12960:1998, modifiziert)*