Die Küste, 55 EAK (1993), 215-231

Empfehlungen B

Boden und Baugrund für Küstenschutzwerke

Inhalt

1. Untergrundaufschluß 215
1.1 Allgemeines 215
1.2 Bohrungen 216
1.3 Sondierungen 216
2. Bodenkennwerte des Untergrundes 217
2.1 Allgemeines 217
2.2 Klassifikations- und Zustandsbeschreibung des Bodens 217
2.3 Bodenmechanische Kennwerte bindiger Böden 218
2.4 Bodenmechanische Kennwerte nichtbindiger Böden 219
2.5 Charakteristische Bodenkennwerte 220
2.6 Bodenklassifikation für Baggerarbeiten 220
3. Bodenkennwerte von Erdbaukörpern 221
3.1 Allgemeines 221
3.2 Anforderungen an nichtbindige Böden 222
3.3 Anforderungen an bindige Böden 222
3.4 Besonderheiten des Kleis 223
4. Grundsätze für erdstatische Berechnungen 224
4.1 Allgemeines 224
4.2 Vorschriften und Empfehlungen 225
4.3 Setzungen von Deichen 225
4.4 Standsicherheit von Deichen 227
4.5 Pfahlgründungen 228
5. Schriftenverzeichnis und Normen 229

1. Untergrundaufschluß

1.1 Allgemeines

Erste Erkenntnisse über den Bodenaufbau des Baugeländes können aus der Sichtung und Bewertung vorhandener Unterlagen, insbesondere aus geologischen Karten, gewonnen werden. Zur Baugrunderkundung dienen Bohrungen, Sondierungen und Schürfe. Im Hinblick auf die Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Baugrund soll der Sachverständige für Geotechnik schon möglichst vor der Ausschreibung der Bohrarbeiten eingeschaltet werden.

Die Bohrungen sind nach DIN 4021 auszuführen, wobei die erbohrten Bodenarten nach DIN 4022 Teil 1 und 2 bzw. DIN 18196 benannt und die Ergebnisse nach DIN 4023 dargestellt werden. Bei Linienbauwerken sollten die Ergebnisse in einem geotechnischen Längsschnitt aufgetragen werden. Hauptbohrungen werden bei Linienbauwerken im Abstand von etwa 100 bis 200 m in der Bauwerksachse angeordnet. Bei schwierigen geologischen Verhältnissen sowie bei Unregelmäßigkeiten im Untergrund sind zusätzlich Nebenbohrungen durchzuführen. In jedem Fall sollte ein hinreichender Überblick über die Baugrundverhältnisse auch längs eines Streifens auf beiden Seiten des Bauwerks gewonnen werden (EAU, E1). Als Bohrabstände bei einzelstehenden Bauwerken gibt DIN 1054 maximal 25 m an. Die

Die Küste, 55 EAK (1993), 215-231

Bohrtiefe richtet sich nach der Mächtigkeit der die Setzungen und die Standsicherheit beeinflussenden Bodenschichten (DIN 4020). Weiche Bodenschichten sollten bis zum festen Untergrund erkundet werden.

Zusätzlich zu den Bodenaufschlüssen sind die Grundwasserverhältnisse über einen längeren Zeitraum durch Grundwasser-Meßstellen zu erkunden (DIN 4020 und DIN 4021).

1.2 Bohrungen

Die nacheiszeitlichen Ablagerungen im norddeutschen Küstenraum zeichnen sich durch einen häufigen Wechsel zwischen nichtbindigen und bindigen sowie organischen Sedimenten aus. Ihre Mächtigkeit kann bis zu 35 m betragen. Im Küstenraum der Ostsee kommen häufig eiszeitlich vorbelastete Böden (z. B. Geschiebemergel) mit Kies- und Gerölleinlagen vor.

Um die Feinschichtung des Untergrundes zuverlässig erkennen zu können, bietet sich als Bohrverfahren bei Hauptbohrungen ein Baugrundaufschluß mit durchgehender Gewinnung gekernter Bodenproben an (DIN 4021, Tabelle 1). Bei allen bindigen und organischen Bodenarten können die maßgebenden bodenmechanischen Kennwerte nur an ungestörten Bodenproben bestimmt werden. Dazu sind zusätzlich zu den Kernproben Sonderproben der Güteklasse 1 bis 2 gem. DIN 4021 zu entnehmen.

Als Nebenbohrungen eignen sich sogenannte Kleinbohrungen nach DIN 4021.

1.3 Sondierungen

Zur Ermittlung der Lagerungsdichte nichtbindiger Böden werden noch zusätzlich Sondierungen nach DIN 4094 erforderlich. Um die Anzahl der Sondierungen gezielt und in einem möglichst wirtschaftlichen Rahmen durchzuführen, wird die Lage der Sondierpunkte und die Sondiertiefe nach Durchführung der Bohrungen festgelegt.

Drucksondierungen haben sich dabei als geeignetes Sondierverfahren erwiesen, um die Festigkeit von nichtbindigen Böden zu bestimmen und daraus die maßgebenden Bodenkennwerte zu ermitteln. Durch getrennte elektronische Registrierung von Spitzendruck und Mantelreibung können außerdem der Schichtenaufbau und die Schichtgrenzen von Bohrungen überprüft werden. Drucksondierungen mit gleichzeitiger Porenwasser-Druckmessung lassen ebenfalls eine gute Aufschlußmöglichkeit bei Wechsellagerungen von nichtbindigen und bindigen Böden zu. Durch Dissipationstests, bei denen innerhalb einer organischen oder bindigen Schichtenfolge der Sondenvorschub gestoppt wird und in einer nachfolgenden Ruhepause der Abbau des Porenwasserüberdrucks gemessen wird, läßt sich nach Levadoux u. Baligh [9] der Konsolidierungsbeiwert und indirekt der Durchlässigkeitsbeiwert vor Ort ermitteln. Dieses zumeist erst nach der eigentlichen Baugrunderkundung angewandte Untersuchungsverfahren bietet dort große Vorteile, wo Bemessungskriterien für eine Schütthöhenbegrenzung, gegebenenfalls in Verbindung mit Vertikaldräns, zur Berechnung der Verfestigung weicher toniger und organischer Schichten im Untergrund durch Teilkonsolidierungen ermittelt werden sollen.

Falls Drucksondierungen nicht durchführbar sind, kann auf die Ausführung von Rammsondierungen zur Ermittlung der Festigkeiten von nichtbindigen Bodenschichten zurückgegriffen werden. Der Eindringwiderstand bei Rammsonden wird, trotz verdickter Spitze, durch Mantelreibung am Gestänge beeinflußt. Das ist besonders dann der Fall, wenn im Untergrund bindige Bodenschichten eingelagert oder wenn nichtbindige Böden eine

Die Küste, 55 EAK (1993), 215-231

besonders hohe Lagerungsdichte aufweisen. Deshalb sind Rammsondierungen im Gegensatz zu Drucksondierungen weder zur Feststellung von Schichtgrenzen noch von Bodenarten geeignet. Der Einsatz von Rammsonden ist sinnvoll für maximale Untersuchungstiefen von ca. 5 m bei der Leichten Rammsonde und bis 12 m bei der Schweren Rammsonde. Für noch größere Untersuchungstiefen oder im freien Wasser kommt die Standard-Penetration-Sonde (SPT) zur Anwendung. Diese Sonde arbeitet wie eine Rammsonde und wird, am Seil hängend, bei einer Bohrung auf der Bohrlochsohle eingesetzt.

Die Feldflügelsonde nach DIN 4096 wird zur Ermittlung der Anfangsscherfestigkeit bindiger und organischer Weichböden eingesetzt. Die Flügelsonde wird entweder direkt in den Boden gepreßt oder von der Bohrlochsohle aus eingesetzt. Feldflügelsondierungen sind dann durchzuführen, wenn aus breiigen bis weichen bindigen Böden keine Sonderproben zu gewinnen sind.

2. Bodenkennwerte des Untergrundes

2.1 Allgemeines

Um Bodenkennwerte für die angetroffenen Bodenschichten angeben zu können, sind Laborversuche an Bodenproben durchzuführen sowie Sondierergebnisse auszuwerten. Bodenproben werden sowohl für nichtbindige als auch für bindige Bodenarten zur Ermittlung von Klassifizierungsmerkmalen und erdstatischen Kennwerten benötigt, wobei letztere für bindige und organische Böden nur an Sonderproben durch Laborversuche und für nichtbindige Bodenarten aufgrund von Sondierergebnissen bestimmt werden.

2.2 Klassifikations- und Zustandsbeschreibung des Bodens

Zur Klassifikation und Zustandsbeschreibung des Bodens sind die in Tabelle B1 zusammengestellten Laborversuche durchzuführen, die Ergebnisse über Korngrößen, Dichte des Bodens und Wassergehalte sowie über die im Boden enthaltenen Nebenbestandteile liefern.

Nach DIN 18 122 werden für bindige Böden zunächt die Fließ-, Ausroll- und Schrumpfgrenzen bestimmt. Die hiernach ermittelte Konsistenzzahl I_c führt jedoch bei sensitiven und inhomogenen Böden (z. B. Klei und Geschiebemergel) im Vergleich zu der nach DIN 4022

Tabelle B1. Laborversuche zur Klassifikation und Zustandsbeschreibung von Böden

Titel	Norm
Wassergehalt; Bestimmung d. Ofentrocknung	DIN 18 121
Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen)	
a) Laborversuche	DIN 18 122
b) Feldversuche	DIN 4022 Teil 1
Bestimmung der Korngrößenverteilung	DIN 18 123
Bestimmung der Korndichte	DIN 18 124
Bestimmung der Dichte des Bodens	DIN 18 125
Bestimmung des Glühverlusts	DIN 18 128
Bestimmung des Kalkgehalts	DIN 18 129

Die Küste, 55 EAK (1993), 215-231

Teil 1 vorgenommenen Ansprache zu unterschiedlichen Ergebnissen in der Konsistenz. Nach SCHUPPENER u. KIEKBUSCH [13] kann die Konsistenz durch Bestimmung der Scherfestigkeit des undränierten Bodens (Anfangsscherfestigkeit c_u) z. B. mit dem Taschenpenetrometer zutreffender gemäß Tabelle B2 eingestuft werden.

Tabelle B2. Konsistenz in Abhängigkeit von der Anfangsscherfestigkeit nach [13]

Anfangsscherfestigkeit c_u [kN/m^2]	Benennung der Konsistenz
< 5	flüssig
5 – 15	breiig
15 – 35	sehr weich
35 – 80	weich
80 – 200	steif
200 – 400	halbfest
> 400	fest

Die Wasserdurchlässigkeit wird bei bindigen und gemischtkörnigen Böden nach DIN 18 130 ermittelt. Bei Sanden kann die Wasserdurchlässigkeit unter Berücksichtigung der Ungleichförmigkeit U und der Lagerungsdichte D zutreffender nach BEYER [4] als nach DIN 18 130 bestimmt werden. Ein Pumpversuch vor Ort liefert die genauesten Angaben.

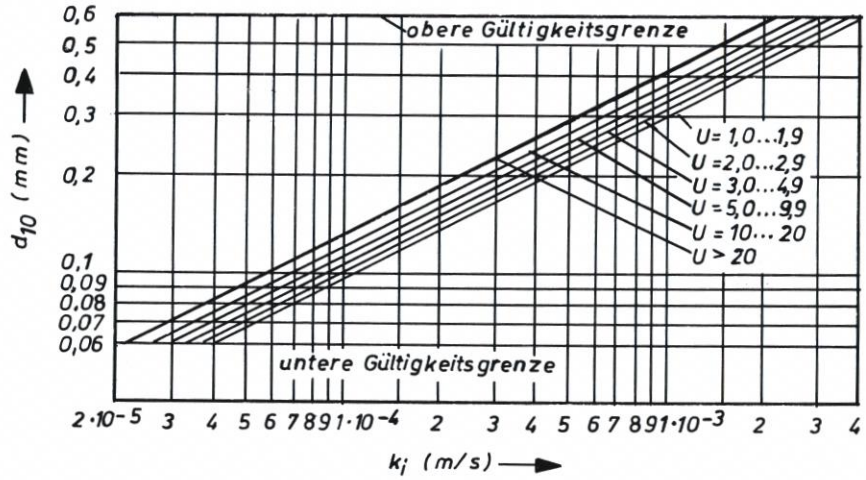

Abb. B1. Beziehung zwischen d_{10} und der Durchlässigkeit k in Abhängigkeit von U nach BEYER [4]

2.3 Bodenmechanische Kennwerte bindiger Böden

Mit den erdstatischen Kennwerten wird das Verhalten des Bodens bei Belastungsänderungen beschrieben, wobei zwischen dem Anfangszustand und dem Endzustand unterschieden wird. Für den Anfangszustand ist die Scherfestigkeit des undränierten Bodens (Anfangsscherfestigkeit) maßgebend, während für den Endzustand die Scherfestigkeit des dränierten und konsolidierten Bodens (Endscherfestigkeit) anzusetzen ist.

Die Küste, 55 EAK (1993), 215-231

Die zur Bestimmung der jeweiligen Scherfestigkeit üblichen Versuche sind in Tabelle B3 zusammengestellt.

Tabelle B3. Labor- und Feldversuche zur Ermittlung der Scherfestigkeit

	Anfangsscherfestigkeit Für den undränierten Boden kann ermittelt werden:		Endscherfestigkeit Für den dränierten Boden kann ermittelt werden:	
Erstkonsolidierte und wassergesättigte Böden zum Beispiel: Klei, Mudde	a) Totaler Reibungswinkel ψ_u aus:		Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s aus:	
	UU-Versuch	DIN 18 137	CU-Versuch	DIN 18 137
			CD-Versuch	DIN 18 137
	b) Kohäsion c_u aus:			
	UU-Versuch	DIN 18 137		
	Einaxialversuch	DIN 18 136		
	Taschenpenetrometer			
	Laborflügelversuch			
	Feldflügelsondierung	DIN 4096		
Überkonsolidierte und wassergesättigte Böden zum Beispiel: Lauenburger Ton Geschiebemergel	a) Totaler Reibungswinkel ψ_u aus:		a) Effektiver Reibungswinkel ψ'	
	UU-Versuch	DIN 18 137	b) Effektive Kohäsion c'	
	b) Kohäsion c_u aus:		CU-Versuch	DIN 18 137
			CD-Versuch	DIN 18 137
	UU-Versuch	DIN 18 137		
	Einaxialversuch	DIN 18 136		
	Taschenpenetrometer			
	Laborflügelversuch			

Wird die Anfangsscherfestigkeit c_u aus Flügelsondierungen ermittelt, sind die gemessenen Werte in Abhängigkeit von der Plastizitätszahl I_p nach EAU, E 88, abzumindern.

Ein Maß für die Zusammendrückbarkeit von Böden ist der Steifemodul E_s, der bei bindigen Böden durch Kompressionsversuche ermittelt wird. Für Setzungsberechnungen ist bei erstkonsolidierten Böden der Steifemodul aus dem Erstbelastungsast und bei überkonsolidierten Böden aus dem Wiederbelastungsast zu ermitteln. Nach [6] soll der Kompressionsversuch bei überkonsolidierten Böden in der Erstbelastung so durchgeführt werden, daß eine Rückverdichtung der Bodenprobe erfolgt.

Zur Auswertung von Spitzendrucksondierungen hinsichtlich der Scherfestigkeit und Kompressibilität bindiger Weichschichten siehe [14].

2.4 Bodenmechanische Kennwerte nichtbindiger Böden

Da in nichtbindigen Böden keine Sonderproben entnommen werden können, sind deren Festigkeiten aus den Ergebnissen von Sondierungen empirisch abzuleiten.

Bei Drucksondierungen, die gegenüber von Rammsondierungen die zuverlässigeren Ergebnisse liefern, ist der Spitzenwiderstand q_c ein Maß für die Festigkeit des Bodens. Mit „Festigkeit" ist hier summarisch die Eigenschaft eines nichtbindigen Bodens bezeichnet, die durch seine Lagerungsdichte, Korngröße und Kornrauhigkeit gekennzeichnet ist und sich in der Größe des Steifemoduls E_s sowie des Reibungswinkels φ' äußert. Dabei kann in Anlehnung an das Beiblatt 1 der DIN 4094 von folgendem Zusammenhang zwischen dem Sondierergebnis, der Größe des charakteristischen Reibungswinkels φ', dem Steifemodul E_s und der Benennung der Festigkeit ausgegangen werden:

Tabelle B4. Bewertung von Drucksondierergebnissen zur Ermittlung der Festigkeit von Sanden und Kiesen

Spitzenwiderstand q_c [MN/m²]	Charakteristischer Reibungswinkel ψ'	Steifemodul E_S [MN/m²]	Benennung der Festigkeit
< 2	≤ 30°	< 15	sehr gering
2 – 6	30° – 35°	15 – 50	gering
6 – 11	35° – 37,5°	50 – 80	mittel
11 – 19	37,5° – 40°	80 – 100	groß
> 19	≥ 40°	> 100	sehr groß

Sollten in Ausnahmefällen Rammsondierungen erforderlich werden, können der Reibungswinkel φ' und der Steifemodul E_s aus dem Eindringwiderstand N_{10} (Schlagzahlen pro 10 cm Eindringung) nach DIN 4094 ermittelt werden. Bei Standard-Penetrations-Tests (SPT) kann zusätzlich auch Pianc (1984) herangezogen werden.

Die bei Spitzendrucksondierungen gemessene örtliche Mantelreibung erlaubt nach Weiss [20] Rückschlüsse auf die Bodenart und Schichtenfolge.

2.5 Charakteristische Bodenkennwerte

Für Vorentwürfe können aufgrund bisheriger Erfahrungen die in EAU, E9, und die in DIN 1055 Teil 2 angegebenen mittleren Bodenkennwerte als Rechenwerte angenommen werden.

Für Ausführungsentwürfe sind für die Scherfestigkeit charakteristische Werte anzugeben, die in DIN 4020 und EAU, E96, definiert sind. Diese können bei Berechnungen nach EAU den dort genannten Grundwerten gleichgesetzt werden und müssen für die Berechnung mit den Sicherheitsbeiwerten nach EAU, E96, abgemindert werden. Berechnungen nach dem neuen Sicherheitskonzept erfolgen mit den in den entsprechenden Normen angegebenen Teilsicherheitsbeiwerten, mit denen die charakteristischen Bodenkennwerte abgemindert werden. Der Nachweis globaler Sicherheiten wird mit den charakteristischen Werten geführt.

2.6 Bodenklassifikation für Baggerarbeiten

Für Baggerarbeiten sind die anstehenden Böden zu klassifizieren, wobei ihr Verhalten beim Lösen, Laden, Transportieren und Wiedereinbau beurteilt wird. Die folgende Tabelle B5 gibt einen Überblick der dafür anzuwendenden Normen und Empfehlungen.

Die Küste, 55 EAK (1993), 215-231

Tabelle B5. Normen und Empfehlungen zur Klassifizierung des Bodens für Baggerarbeiten

Titel	Norm/Empfehlung
Erd- und Grundbau Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke	DIN 18 196
Erdarbeiten	DIN 18 300
Naßbaggerarbeiten	DIN 18 311
Classification of soils and rocks to be dredged	PIANC (1984)

In den DIN-Normen 18 300 (Erdarbeiten) und 18 311 (Naßbaggerarbeiten) werden die Böden nach ihrer Festigkeit beim Lösen klassifiziert. Bei den bindigen Bodenarten richtet sich diese Klassifizierung vorwiegend nach den Konsistenzgrenzen (s. Abschnitt 2.2). Zu einer Fehleinschätzung der Konsistenz kann es besonders bei halbfesten bis festen bindigen Böden (z. B. Geschiebemergel) kommen, deren natürlicher Wassergehalt nicht wesentlich vom Wassergehalt an der Schrumpfgrenze abweicht.

Werden die Konsistenzgrenzen abweichend von DIN 18 122 bzw. 4022 auf Grundlage der Anfangsscherfestigkeit c_u (nach Tabelle B2) festgelegt, ist der Erdbauunternehmer im Rahmen der Ausschreibung darauf hinzuweisen.

Beim Baggern dichtgelagerter Sande findet entlang der Schnittfläche eine Kornauflockerung mit Porenraumvergrößerung (Dilatation) statt, die bei geringdurchlässigem Feinsand infolge verzögerten Wasserzutritts zu einem Druckverlust an der Schneide mit einer deutlichen Zunahme der zum Lösen erforderlichen Schnittkraft führen kann [19].

Erfahrungen zur Beurteilung von Böden bei Baggerarbeiten hinsichtlich Geräteeinsatz, -leistung und Wirtschaftlichkeit sind bei [5, 19, 7] beschrieben.

3. Bodenkennwerte von Erdbaukörpern

3.1 Allgemeines

Nicht nur für den Untergrund müssen Bodenkennwerte vorliegen, sondern auch für die in den Erdbaukörper einzubauenden Böden. Diese sind nicht nur für die Standsicherheitsbeurteilung während der Bauphase, sondern auch für künftige Beanspruchungen nach Fertigstellung des Bauwerkes maßgebend. Neben dem Bodenmaterial ist das Maß der Verdichtung entscheidend für die anzusetzenden Bodenkennwerte.

Nach DIN 18 125 und EAU ist im Erdbau zur Überprüfung der Verdichtung nichtbindiger Böden die Lagerungsdichte D zu bestimmen. Im Deichbau hat sich als Maß für die Verdichtung auch der Verdichtungsgrad D_{Pr} bewährt, der im Proctorversuch nach DIN 18 127 zu ermitteln ist. Er gilt sowohl für bindige als auch für nichtbindige Böden. Darüber hinaus werden die geotechnischen Kennwerte für Erdbaukörper nach den im Abschnitt 2 beschriebenen Untersuchungsverfahren ermittelt. Diese sind von dem vorzugebenden Verdichtungsgrad abhängig.

Für Vorentwürfe können die Bodeneigenschaften auf der Grundlage örtlicher Erfahrungen geschätzt werden. Als Hilfsmittel dienen dazu die Angaben der Bodenkennwerttabelle der EAU, E9, und die Tabellenwerte der DIN 1055 Teil 2.

Bei Erdbaukörpern für Küstenschutzbauwerke handelt es sich vorwiegend um Deiche. Diese sind im Gegensatz zu Straßen- und Bahndämmen weniger empfindlich gegen Sackungen

Die Küste, 55 EAK (1993), 215-231

und Setzungen. Deshalb können an die Verdichtung eines sandigen Deichkerns im Regelfall geringere Anforderungen gestellt werden als an einen nach ZTVE-StB 76 errichteten Straßendamm.

3.2 Anforderungen an nichtbindige Böden

Deichkerne werden meistens in kombiniertem Spül- und Trockenbauverfahren hergestellt [7]. Aus bautechnischen Gründen soll der Feinkornanteil ≤ 0,063 mm im Spülsand im Mittel 15 % nicht überschreiten, um eine zügige Entwässerung des Spülfeldes und Profilierung des Deichkörpers zu ermöglichen.

Die Lagerungsdichte innerhalb eines Spülkörpers hängt u. a. von der Körnung des Ausgangsmaterials (Ungleichförmigkeitsgrad), der Konzentration des Spülgemisches, der Spülgeschwindigkeit, der Art des Spülfeldes (offen/geschlossen) und der Höhe des Wasserspiegels im Spülfeld ab. Aus Erfahrungen mit aufgespülten Seedeichen im Küstenbereich [11] werden im allgemeinen Proctordichten von D_{Pr} = 93 bis 103 % erreicht, was einer mitteldichten bis dichten Lagerung entspricht. Am Spülfeldende und beim Umsetzen im Trockenbetrieb kann sie bis auf D_{Pr} = 83 % abfallen, was einer lockersten Lagerung entspricht. Diese Proctordichten zeigen, daß in solchen Deichen keine einheitliche Lagerungsdichte erreicht wird. Deshalb sollte bei Standsicherheitsuntersuchungen (Böschungsbruch nach DIN 4084) von einer sehr geringen Festigkeit der Sande (siehe Tabelle B4, Abschnitt 2) ausgegangen werden. Erfahrungsgemäß sind die heute üblicherweise mit 1:3 bis 1:6 und flacher geneigten Böschungen der Seedeiche mit diesen geringen Festigkeiten ausreichend standsicher. Falls für die Standsicherheit höhere Bodenkennwerte erforderlich sind, kann dies durch Wahl besseren Materials und durch Steuerung des Spülbetriebes erreicht werden. Dies ist dann unbedingt durch Druck- oder Rammsondierungen zu kontrollieren.

Für den im Trockenbetrieb aufgesetzten sandigen Deichkern kann eine lagenweise Verdichtung durchgeführt werden. Ob dies erforderlich ist, zeigt sich aus den vorab durchgeführten Standsicherheitsberechnungen.

Unter Deichverteidigungswegen sollte der aufgesetzte, nichtbindige Boden bis in 0,5 m Tiefe unter dem Rohplanum auf D_{Pr} = 100 % verdichtet werden.

3.3 Anforderungen an bindige Böden

Die Eigenschaften des bindigen Füllbodens – der Klei im norddeutschen Raum ist ein Sonderfall – sind abhängig von der Trockendichte und dem Verdichtungsgrad zu ermitteln. Dazu werden an dem einzubauenden Boden im geotechnischen Labor Proctorversuche durchgeführt und am gleichen Material, soweit erforderlich, die in Tabellen B2 und B3 aufgeführten geotechnischen Parameter bestimmt. Hinsichtlich der Eignung als Baustoff im Wasserbau wird auf die in Tabelle B6 angegebenen Zusammenhänge verwiesen.

Wo der Erdbaukörper aus lagenweise eingebautem und verdichtetem bindigen Boden besteht, sollte vor Baubeginn ein Prüffeld angelegt werden, auf dem die Eignung des vorgesehenen Verdichtungsgerätes erprobt wird. Insbesondere ist dabei der Zusammenhang zwischen Einbauschichtdicke, Zahl der Übergänge des vorgesehenen Verdichtungsgerätes und der nach den Laborversuchsergebnissen geforderten Trockendichte zu ermitteln, woraus der erreichte Verdichtungsgrad folgt. Im Deichkörper soll bei der Verdichtung von bindigem Boden ein Verdichtungsgrad von

$$D_{Pr} = 92 \text{ bis } 95\ \%$$

Die Küste, 55 EAK (1993), 215-231

erreicht werden, wobei der Gehalt an luftgefüllten Poren 12 % nicht übersteigen darf. Der Einbau des Bodens ist ständig mit den am Prüffeld geeichten Verfahren daraufhin zu kontrollieren, ob das Schüttgut nach Art und Verdichtung die getroffenen Voraussetzungen erfüllt. Bei Deichschüttungen sollte ein Kontrollversuch je 2500 m^3 eingebauten Bodens vorgesehen werden.

Tabelle B6. Anforderungen an bindige Böden im Wasserbau nach STRIEGLER (1968)

Plastizität	W_L [%]	I_P [%]	Q_{Pr} [t/m^3]	W_{Pr} [%]	E_s [MN/m^2] bei Proctorwerten	Verdichtbarkeit
schwach	< 25	< 8	> 1,9	< 11	> 2	gut
mittel	25 – 40	8 – 20	1,9 – 1,75	11 – 17	2 – 1,5	normal
stark	40 – 55	20 – 32	1,75 – 1,6	17 – 22	1,5 – 1	mäßig
sehr stark	> 55	> 32	< 1,6	> 22	< 1	schlecht bis unmöglich

3.4 Besonderheiten des Kleis

Der Klei nimmt an der deutschen Nordseeküse eine Sonderstellung ein. Seine Kohäsion macht ihn widerstandsfähig gegen Wellenangriff. Deshalb wird Klei bevorzugt zur Böschungsabdeckung (Kleidecke) auf Sandkernen verwendet, was meistens wirtschaftlich gegenüber anderen Baustoffen ist und das Landschaftsbild nicht beeinträchtigt. So werden die guten Eigenschaften des schnell entwässernden, befahrbaren Sandes mit dem höheren Erosionswiderstand des Kleis gegenüber dem Wellenangriff verbunden.

Bei der Erkundung von zum Deichbau geeignetem Kleimaterial ist zu beachten: Der geologische Begriff Klei beschreibt lediglich den etwa gleichartigen Entstehungsvorgang der Bodenart. Seine physikalischen, chemischen und geotechnischen Eigenschaften können jedoch sehr schwanken und sich auf kurzer Entfernung ändern. Deshalb muß eine Fläche, aus der gewachsener Klei für den Deichbau gewonnen werden soll, soweit keine Erfahrungen vorliegen, in verhältnismäßig engem Raster von etwa 50 m abgebohrt werden. Es genügt die Ausführung von Kleibohrungen mit Entnahme gekernter Bodenproben der Güteklasse 3 nach Tabelle 4 der DIN 4021, an denen der Wassergehalt und häufig auftretende Sandbänderungen zutreffend festgestellt werden können. Bei der Wiederverwendung von Altdeichmaterial darf die Aufschlußdichte im Deich auf einen Abstand von 100 m vergrößert werden.

Die fehlende Verdichtbarkeit des im gewachsenen Zustand im allgemeinen wassergesättigten Kleis kann in Kauf genommen werden. Es dürfen jedoch zwischen den eingebauten Kleiklumpen k e i n e H o h l r ä u m e verbleiben. Nach den bei Deichneubauten der letzten Jahre gesammelten Erfahrungen gelingt das beim Einbau in Lagen von 30 bis 50 cm Dicke, die mit Planierraupen unter möglichst hohem Flächendruck angedrückt werden. Bei der Verwendung von angetrocknetem, weich- bis steifplastischen bindigen Altdeichmaterial ist eine Zerstörung der Klumpen durch Umsetzen und lagenweise Verdichtung mit schweren Raupenfahrzeugen zum Schließen der Hohlräume besonders wichtig.

Die Befahrbarkeit eines weichen bindigen Bodens hängt entscheidend von der Anfangsscherfestigkeit c_u ab. Nach BARTELS-LANGWEIGE [1] ist dessen uneingeschränkte Bearbeitbarkeit gegeben bei Erdbaugeräten mit

Die Küste, 55 EAK (1993), 215-231

geringem Bodendruck	(σ = 22–40 kN/m^2)	für $c_u \geq$ 14 kN/m^2
mittlerem Bodendruck	(σ = 40–58 kN/m^2)	für $c_u \geq$ 18 kN/m^2
hohem Bodendruck	($\sigma >$ 58 kN/m^2)	für $c_u \geq$ 22 kN/m^2

Beim wassergesättigten Klei, dessen Wassergehalt im natürlichen Zustand je nach Anteil an Feinstkorn und organischer Substanz zwischen $30 < w < 120$ % im allgemeinen weit über dem optimalen Wassergehalt von $20 < w_{opt} < 30$ % liegt, kann ein Bezug zur Proctordichte oder dem zugehörigen optimalen Wassergehalt nicht hergestellt werden. Viele für die Beurteilung als Deichbaumaterial relevante geotechnische Kennwerte hängen sowohl vom Wassergehalt als auch von der Kornzusammensetzung des Bodens ab, was in der Bodenentnahme ebenso wie innerhalb der Kleiabdeckung orts-, tiefen- und zeitabhängigen Schwankungen unterliegt.

Ein für die Deichabdeckung geeigneter Klei sollte die in Tabelle B7 genannten Grenzwerte der Bodeneigenschaften erfüllen.

Tabelle B7. Grenzwerte der Bodeneigenschaften für Klei im Deichbau

	Bodeneigenschaft	Grenzwerte
a)	Gehalt an organischen Bestandteilen (Glühverlust)	$V_{gl} < 10$ %, max. 15 %
b)	Sandanteil (d > 0,06 mm)	< 40 %
c)	Sand- und Schluffanteil (d > 0,002 mm)	< 70 %
d)	Tonanteil (d < 0,002 mm)	> 10 (15) %
e)	Fließgrenze Ausrollgrenze Plastizitätszahl	$W_L > 25$ (45) % $W_P > 15$ (25) % $I_P > 10$ (20) %
f)	Anfangsscherfestigkeit	$C_u > 20$ (30) kN/m^2
g)	Trockendichte	0,85 (1,0) < ϱ_d < 1,45 t/m^3
h)	Einbauwassergehalt	80 (60) % > w > 30 %

Diese Grenzwerte sind nach den in Tabelle B2 und B3 angegebenen Laborversuchen zu ermitteln. Die eingeklammerten Zahlenwerte gelten für besonders exponierte Seedeiche.

Diese Anforderungen beruhen auf Erfahrungen, die bei Deichverstärkungen und Deichneubauten an der deutschen Nordseeküste gesammelt wurden. Die Qualitätsanforderungen a) bis f) gelten für Kleiabdeckungen von 1,3 m (Außenböschung) bzw. 0,5 m (Innenböschung) Dicke. Wo ein Deichkörper vollständig aus Klei hergestellt wird, können die Qualitätsanforderungen zu a) bis e) gemindert werden, weil dann bei Böschungsausschlägen von mehr als 1,3 m Tiefe der Bestand des Deiches – anders als beim Sandkerndeich – nicht unmittelbar gefährdet ist.

4. Grundsätze für erdstatische Berechnungen

4.1 Allgemeines

Erdkörper wie Deiche und Dämme und auch feste Bauwerke aus Beton, Holz oder Stahl belasten und verformen den Untergrund, was wiederum zu Zwängungsbeanspruchungen in Bauwerken führt. Die Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Baugrund ist im Rahmen der

Die Küste, 55 EAK (1993), 215-231

„allgemeinen anerkannten Regeln der Baukunst" mit dem Ziel vorauszuberechnen, daß im Bau- und Gebrauchszustand am Bauwerk keine Schäden entstehen. In schwierigen Fällen oder wenn die Entwurfsaufsteller die entsprechenden Spezialkenntnisse nicht besitzen, ist ein erfahrener Sachverständiger der Geotechnik einzuschalten. Im folgenden wird auf einige wichtige Grundsätze und Zusammenhänge hingewiesen.

4.2 Vorschriften und Empfehlungen

Die übergeordnete Norm für alle Erd- und Grundbaumaßnahmen ist DIN 1054. Für Erdbauwerke ist in der Regel die Böschungsstandsicherheit und für feste Bauwerke, die einseitig höher hinterfüllt werden, die Geländebruchsicherheit nach DIN 4084 nachzuweisen. Außerdem sind für Erdbauwerke – wie für feste Bauwerke – Grundbruchuntersuchungen nach DIN 4017 erforderlich. Flächengründungen von festen Bauwerken sind nach DIN 4018 zu berechnen, Pfahlgründungen nach DIN 4014 (Bohrpfähle) oder nach DIN 4026 (Rammpfähle). Für Entwurf und Ausführung von Spundwänden und anderen Ufersicherungsbauwerken sind die EAU zu beachten, die auch viele konstruktive Hinweise enthalten. Für Verankerungen werden hauptsächlich Ankerpfähle, gelegentlich auch Verpreßanker nach DIN 4125 verwendet.

Zur Ermittlung der Zusammendrückbarkeit von Boden ist der Steifemodul im Labor zu bestimmen. Dieser Parameter dient auch zur Berechnung der Setzungen nach DIN 4019. Sofern fester Baugrund wie Sand oder Geschiebemergel nahe der Geländeoberfläche ansteht, ist die Berechnung der Setzungen nach dieser Norm weder für feste Bauwerke noch für Erdbauten problematisch. Im Küstenraum stehen jedoch häufig bis zu 20 m unter Gelände weiche, bindige und organische Bodenschichten an. Feste Bauwerke, wie z. B. Sturmflutsperrwerke, werden unter solchen Verhältnissen in der Regel auf Pfählen gegründet. Bei Erdbaukörpern wie Dämmen und Deichen ist das nicht möglich, und insofern ist die Setzungsberechnung für die Festlegung der Überhöhung besonders wichtig.

4.3 Setzungen von Deichen

In Weichböden unterscheidet man drei Setzungsanteile:

- Bei der Lastaufbringung treten sofort volumenkonstante Verformungen, das sind Setzungen unter der Last und Bodenverdrängung nach den Seiten sowie neben der Last nach oben, als sogenannte Initialsetzungen ein. Wird der Boden überlastet, so überwiegen die Initialsetzungen gegenüber den folgenden Setzungsanteilen; im Extremfall tritt Grundbruch ein.
- Dann folgen die Konsolidationssetzungen, bei denen der Boden unter der Last zusammengedrückt wird. Wegen seiner geringen Durchlässigkeit entsteht zunächst Porenwasserüberdruck, der anfangs einen Teil der Last trägt und zur Auspressung von Porenwasser führt. Diese Entwässerung dauert so lange, bis die Druck- und Reibungsspannungen zwischen den Bodenpartikeln im Gleichgewicht mit der aufgebrachten Last sind.
- Zeitlich parallel mit den Konsolidationssetzungen, über die Phase der meßbaren Porenwasserüberdrücke hinausreichend, kriecht der Boden so lange, bis die Kohäsionsanteile der Spannungen abgebaut und durch Reibungsspannungen zwischen den Bodenpartikeln aufgenommen sind. Dies sind die Kriechsetzungen.

Bei ausreichender Standsicherheit gegen Böschungsbruch sind beim Deichneubau

Die Küste, 55 EAK (1993), 215-231

auf Weichschichten die Initialsetzungen gegenüber den Konsolidations- und Kriechsetzungen im allgemeinen gering. Das dürfte vor allem auf die günstige Belastungsfigur der Seedeiche mit ihren flachen Böschungen, wie sie heute gebaut werden, zurückzuführen sein. Eine genaue Ermittlung der Zusatzspannungen aus der Deichlast im Untergrund nach DIN 4019 lohnt meist nicht, da bei den üblichen Deichabmessungen (6 bis 9 m Höhe und ≥ 80 m Breite) die Belastung von der Mitte zu den Lasträndern hin allmählich abnimmt. Die seitliche Ausbreitung der Spannungen aus der Deichlast in der Weichschicht ist dann nicht sehr groß, so daß mit guter Näherung die Setzung s an jeder Stelle aus dem linearen Ansatz

$$s \approx \gamma \cdot H \cdot \sum \frac{h}{E_s} \text{ [m]}$$

berechnet werden kann.

s = Setzung [m]
γ = Feuchtwichte des Deichbodens [kN/m³]
H = Höhe des aufgebrachten Deichkörpers [m]
h = Mächtigkeit der einzelnen Weichschicht [m]
E_s = Steifemodul der einzelnen Weichschicht [kN/m²]

Bei einer Altdeichverstärkung auf weichem Untergrund ist eine genauere Spannungsermittlung nach DIN 4019 in der Regel unverzichtbar. In einem solchen Fall sind die Setzungen unter der im nicht bzw. im wenig vorbelasteten Bereich liegenden neuen Böschung oft größer als unter der meist im höher vorbelasteten Bereich liegenden neuen Deichkrone. Bei der Begradigung einer gewundenen Altdeichlinie sollte besonders auf eine ausreichende Überhöhung der vorher unbelasteten Deichabschnitte geachtet werden.

Die Setzungsanteile aus den tragfähigen Bodenschichten unterhalb der Weichschicht sind vernachlässigbar klein.

Die Deiche müssen beim Bau um das errechnete Setzungsmaß überhöht werden. Die Böschungsabdeckungen erfahren bei der Setzung eine Stauchung, die infolge der flachen Böschung aber unerheblich ist.

Die Setzungsdauer t kann für Deichneubauten bei beidseitiger Entwässerung des weichen Untergrundes nach folgender Formel grob abgeschätzt werden:

$$t = \frac{\gamma_w}{k \cdot E_s} \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^2 \text{ [s]}$$

t = Setzungsdauer [s]
γ_w = Wichte des Wassers [kN/m³]
k = Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]

Wenn die Weichschicht nur nach oben oder nach unten entwässern kann, weil auf der gegenüberliegenden Seite ein undurchlässiger Boden angrenzt, ist statt h/2 die volle Schichtdicke h zu berücksichtigen.

Bei größerer Streuung des Steifemoduls E_s, besonders aber des Durchlässigkeitswertes k, empfiehlt es sich, für diese beiden Parameter plausible obere und untere Werte in obiger Formel anzuwenden und schließlich eine Mittelbildung zur Errechnung der Setzungszeit vorzunehmen.

Von den errechneten Setzungen treten etwa 50 % bereits innerhalb von etwa 20 % der errechneten Zeit ein, während ca. 80 % der Setzungen nach Verlauf von ca. 50 % dieser Zeit zu erwarten sind (Abb. B2).

Die Küste, 55 EAK (1993), 215-231

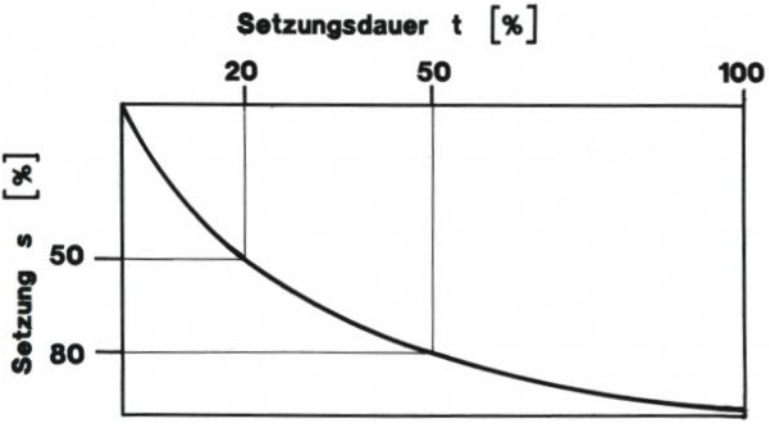

Abb. B2. Typischer Zeit-Setzungsverlauf im Weichboden unter Deichneubauten

Der zeitliche Verlauf der Setzungen ist bei Deichverstärkungen außer vom Untergrund auch vom Kronenabstand Alt-/Neudeich abhängig [17].

Die Setzungen im bindigen Boden können durch Anordnung von Vertikaldränungen beschleunigt werden. Eine solche Maßnahme wird im Deichbau allerdings auf besondere Fälle, zum Beispiel unter Bauwerken oder Straßen in und am Deich, beschränkt bleiben. Ihre Bemessung ist nach TERZAGHI u. JELINEK [18], Abschnitt 106, möglich. Über ihre Ausführung finden sich Angaben in EAU, E93.

4.4 Standsicherheit von Deichen

Der Deichquerschnitt muß ausreichend standsicher gegen Böschungsbruch sein. Entsprechende Standsicherheitsuntersuchungen werden nach DIN 4084 durchgeführt. Dabei ist für den Katastrophenfall (defekte Dichtung auf dem Sandkern bei Sturmflut) wie bei Dämmen auf undurchlässigem Untergrund eine Sickerlinie anzunehmen, unterhalb welcher der Deich durchströmt wird. Zur Ermittlung des ungünstigsten Gleitkreises stehen geeignete EDV-Programme zur Verfügung.

Bei nicht ausreichender rechnerischer Standsicherheit kann diese durch verschiedene Maßnahmen – wie z. B. Abflachung der Böschung, Verwendung von Deichmaterial größerer Scherfestigkeit oder Verbesserung der Tragfähigkeit des Untergrundes – erhöht werden. Eine geeignete Methode ist vor allem die Verringerung des Porenwasserüberdruckes durch längere Bauzeit, indem der Deichkörper in zwei oder mehr Lagen hergestellt wird. Hierbei wird der Bauablauf durch Porenwasser-Druckmessungen überwacht, so daß eine Kontrolle darüber besteht, wie sich die Scherfestigkeit des belasteten weichen, bindigen Untergrundes infolge Teilkonsolidierung unter der Auflast verbessert.

Hinsichtlich der Ermittlung und Zugrundelegung der Festigkeitsverteilung im Untergrund wird auf das mögliche Vorkommen von Schwächezonen in den ansonsten verfestigten Weichschichten unter Altdeichkörpern hingewiesen [16].

Zur Gewährleistung ausreichender Standsicherheit bei aufgespülten Deichkörpern sind gegebenenfalls auch Maßnahmen zu treffen, um eine rückschreitende Erosion und

schließlich konzentrierte Durchströmung zu verhindern. Dieser Fall kann bei unzureichender Unterläufigkeitssicherung, besonders aber dann gegeben sein, wenn die Kleiabdeckung auf relativ steiler Innenböschung eines durchströmten Sandkerns beschädigt ist und dort Sickerwaser austritt. Das Abdecken des betreffenden Böschungsbereichs mit einem geeigneten Auflastfilter ist hier eine notwendige Sofortmaßnahme. Bei trocken aufgesetzten Deichen ist ggf. auch zu überprüfen, ob eine ausreichende Sicherheit gegen Suffusion (Ausspülung von Feinstanteilen aus dem Korngerüst) gegeben ist.

In Zusammenhang mit dem Deichuntergrund ist schließlich noch die Möglichkeit eines hydraulischen Grundbruchs zu beachten. Sie ist dort gegeben, wo unter einer verhältnismäßig dünnen bindigen Deckschicht gut durchlässige Sande und Kiese liegen und sich somit bei hohem Außenwasserstand ein artesischer Druck hinter dem binnenseitigen Deichfuß einstellen kann. Dieser Fall tritt zwar meist nur bei Hochwasser an binnenländischen Flußdeichen auf (siehe [22]), ist jedoch gegebenenfalls auch bei Sturmflutwasserständen an Seedeichen zu untersuchen.

Eine geeignete Sicherung gegen hydraulischen Grundbruch wird durch die Schaffung einer Druckentlastung am binnenseitigen Böschungsfuß bewirkt, indem dort die bindige Deckschicht bis zum darunterliegenden durchlässigen Boden in einem ausreichend breiten Graben entfernt wird. Alternativ kann die Aufnahme des Überdrucks durch Belastung des binnenseitigen Böschungsfußes erreicht werden, indem dort entweder zusätzlicher Boden aufgeschüttet oder die gesamte Innenböschung abgeflacht wird.

4.5 Pfahlgründungen

Feste Bauwerke müssen an der Küste wegen der oft mächtigen Weichschichten meist auf Pfählen tief gegründet werden. Dabei sind sowohl Druck- als auch Zugpfähle ausreichend weit in den unteren tragfähigen Boden einzubringen. Einzelheiten sind in der DIN 1054 angegeben.

Für Rammpfähle gilt außerdem die DIN 4026, wo für verschiedene Pfahlarten die zulässigen Tragfähigkeitswerte angegeben sind. Bei Überschreitung der Tabellenwerte oder falls der Baugrund den in der DIN 4026 gestellten Anforderungen nicht entspricht, kann eine Vorbemessung der Rammpfähle nach Franke [8] mit den dort in Tabelle 2 angegebenen Grenzwerten für Mantelreibung und Pfahlspitzenwiderstand vorgenommen werden. Die so ermittelten Grenztragfähigkeiten sind dann durch Pfahlprobebelastungen nachzuweisen und mit den gemäß DIN 1054 erforderlichen Sicherheitsbeiwerten abzumindern.

Bei einer Gründung mit Bohrpfählen kann die Bemessung nach der DIN 4014 (März 1990) durchgeführt werden.

Abschließend wird auf die gegebenenfalls zu berücksichtigende Belastung der Pfähle infolge negativer Mantelreibung und/oder Seitendruck hingewiesen.

Pfahlgründungen werden dann durch negative Mantelreibung beansprucht, wenn eine Weichschicht unter oder neben dem Bauwerk durch eine Geländeaufhöhung zusammengedrückt wird. Bei sehr mächtiger Weichschicht ist eine solche Zusatzbelastung verhältnismäßig groß. Sie ist entweder bei der Bemessung der in diesem Fall nur auf Spitzendruck tragenden Pfähle zu berücksichtigen [2] oder dadurch auszuschalten, daß vor Herstellung der Pfahlgründung die Konsolidationssetzung der Weichschicht abgewartet wird. Eine Beschleunigung kann durch entsprechende Überhöhung der Erdauflast erreicht und durch Setzungsmessungen kontrolliert werden. Dabei ist zu beachten, daß auch der überhöhte Erdkörper ausreichend standsicher ist.

Die Küste, 55 EAK (1993), 215-231

Wird einseitig neben einer Pfahlgründung das Gelände aufgehöht (z. B. Deich neben Sielbauwerk), dann löst dies – vor allem bei sehr weichen Schichten – Seitendruck auf die Pfähle und damit eine Biegebeanspruchung aus. Die Untersuchung dieser Belastung ist im einzelnen bei SCHMIEDEL [12] beschrieben.

5. Schriftenverzeichnis und Normen

[1] BARTELS-LANGWEIGE, J.: Zur Befahrbarkeit bindiger Böden mit Raupenfahrzeugen. Schriftenr. d. Inst. f. Bauwirtschaft u. Baubetrieb, K. SIMONS (Hrsg.), TU Braunschweig, 1987.

[2] BAUMGARTL, W.: Ein einfaches Rechenmodell für negative Mantelreibung (Plastisches Modell PM). Beiträge zum Symposium Pfahlgründungen, 12. u. 13. 3. 1986 in Darmstadt.

[3] FRANKE, E. (Hrsg.), Inst. für Grundbau, Boden- und Felsmechanik, TH Darmstadt, S. 71 ff., 1986.

[4] BEYER, W.: Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. Wasserwirtschaft und Wassertechnik, H. 6, 1964.

[5] BOBZIN, H.: Praktische Naßbaggerei. Mitt. d. Franzius-Inst. f. Wasserbau u. Küsteningenieurwesen d. Univ. Hannover, H. 69, 1989.

[6] BRINCH-HANSEN, J. u. LUNDGREN, H.: Hauptprobleme der Bodenmechanik. Springer, Berlin, 1960.

[7] BRÖSSKAMP, K.-H et al.: Seedeichbau, Theorie und Praxis. Vereinigung der Naßbaggerunternehmungen e.V., Hamburg, 1976.

[8] FRANKE, E.: Pfähle. In SMOLTZCYK, U. (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch, 3. Aufl., T. 2, S. 484 ff., Ernst u. Sohn, Berlin, 1982a.

[9] LEVADOUX, J.-N. u. BALITH, M.-M.: Consolidation after Undrained Piezocone Penetration. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 112, No. 7, July 1986, Teil 1: S. 707–726. Teil 2: S. 727–745, American Society of Civil Enginers.

[10] MUIJS, J. A. u. KRUSE, G. A. M.: Erosion and Permeability of Material für Clay Liners and Dikes. 6th Int. IAEG Congress, Rotterdam, Band 2, S. 1213–1219, 1990.

[11] RICHWIEN, W. u. WEHNER, T.: Bodenmechanische Kennwerte gespülter Seedeiche im norddeutschen Küstenraum. Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau (TIS), H. 10, S. 544–549, 1988.

[12] SCHMIEDEL, U.: Seitendruck auf Pfähle. Bauingenieur 59, H. 2, S. 61–66, 1984.

[13] SCHUPPENER, B. u. KIEKBUSCH, M.: Plädoyer für die Abschaffung und den Ersatz der Konsistenzzahl. Geotechnik 4/1988.

[14] SENNESET, K., JANBU, N. u. SVANØ, G.: Strength and Deformation Parameters from Cone Penetration Tests. Proc. 2nd Europ. Symposium on Penetrating Testing, Amsterdam, S. 863–870, 1982.

[15] STRIEGLER, W.: Bodenmechanische Grenzwerte zur Verdichtung natürlicher Erdstoffe im Wasserbau. Wasserwirtschaft und Wassertechnik, H. 2, 1968.

[16] TEMMLER, H.: Messungen beim Deichbau in Schleswig-Holstein. Tagungsband zum Symposium Meßtechnik im Erd- und Grundbau, München 23./24. 11. 1983, Deutsche Gesellschaft f. Erd- u. Grundbau e.V. (Hrsg.), Essen, 1983.

[17] TEMMLER, H.: Analyse von Grundbrüchen beim Deichbau in Schleswig-Holstein. Bericht der 5. Nat. Tag. Ing.-Geol., Deutsche Gesellschaft f. Erd- u. Grundbau e.V. (Hrsg.), Essen, 1985.

[18] TERZAGHI, K. u. JELINEK, R.: Theoretische Bodenmechanik. Springer, Berlin, S. 295 ff., 1954.

[19] VERBEEK, P. R. H.: Soil Analysis and Dredging. Terra et Aqua No. 28, Okt. 1984, S. 11–21, 1984.

[20] WEISS, K.: Baugrunduntersuchungen im Feld. In SMOLTCZYK, U. (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch, 4. Aufl., T. 1, S. 83 ff., Ernst u. Sohn, Berlin, 1990.

[21] EAU (1990): Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen" Häfen und Wasserstraßen. 8. Aufl., Ernst u. Sohn, Berlin.

[22] EMPFEHLUNGEN FÜR FLUSSDEICHE (1971): Hrsg.: Arbeitskreis Flußdeiche des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft e.V. (DVWW), der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) und der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. DGEG.

[23] PIANC (1984): Permanent International Ass. of Navigation Congresses (PIANC) Classification Of Soil & Rocks to Be Dredged Supplement to Bulletin No 47 (1984), Brussels (Belgium).
[24] ZTVE-StB 76 (1976): Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau. Der Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.).
[25] DIN 1054 (1976): Baugrund; Zulässige Belastung des Baugrunds.
[26] DIN 1055 Teil 2 (1976): Lastannahmen für Bauten; Bodenkenngrößen; Wichte, Reibungswinkel, Kohäsion, Wandreibungswinkel.
[27] DIN 4014 (1990): Bohrpfähle; Herstellung, Bemessung und Tragverhalten.
[28] DIN 4017 Teil 1 (1979): Baugrund; Grundbruchberechnungen von lotrecht mittig belasteten Flachgründungen.
[29] DIN 4017 Teil 2 (1979): Baugrund; Grundbruchberechnungen von schräg und außermittig belasteten Flachgründungen.
[30] DIN 4018 (1974): Baugrund; Berechnung der Sohldruckverteilung unter Flächengründungen.
[31] DIN 4019 Teil 1 (1979): Baugrund; Setzungsberechnungen bei lotrechter, mittiger Belastung.
[32] DIN 4019 Teil 1 (1981): Baugrund; Setzungsberechnungen bei schräg und bei außermittig wirkender Belastung.
[33] DIN 4020 (1990): Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke.
[34] DIN 4021 (1990): Baugrund; Aufschluß durch Schürfe und Bohrungen sowie Entnahme von Proben.
[35] DIN 4022 Teil 1 (1987): Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben im Boden und im Fels.
[36] DIN 4022 Teil 2 (1981): Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen im Fels (Festgestein).
[37] DIN 4022 Teil 3 (1982): Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen mit durchgehender Gewinnung von gekernten Proben im Boden (Lockergestein).
[38] DIN 4023 (1984): Baugrund- und Wasserbohrungen; zeichnerische Darstellung der Ergebnisse.
[39] DIN 4026 (1975): Rammpfähle; Herstellung, Bemessung und zulässige Belastung.
[40] DIN 4084 (1981): Baugrund; Gelände- und Böschungsbruchberechnungen.
[41] DIN 4094 (1990): Baugrund; Erkundung durch Sondierungen.
[42] DIN 4096 (1980): Baugrund; Flügelsondierung; Maße des Gerätes, Arbeitsweise, Auswertung.
[43] DIN 4125 (1990): Verpreßanker; Kurzzeitanker und Daueranker; Bemessung, Ausführung und Prüfung.
[44] DIN 18121 Teil 1 (1976): Baugrund; Untersuchung von Bodenproben; Wassergehalt; Bestimmung durch Ofentrocknung.
[45] DIN 18121 Teil 2 (1989): Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Wassergehalt; Bestimmung durch Schnellverfahren.
[46] DIN 18122 Teil 1 (1976): Baugrund; Untersuchung von Bodenproben; Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen); Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze.
[47] DIN 18122 Teil 2 (1987): Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen); Bestimmung der Schrumpfgrenze.
[48] DIN 18123 (1983): Baugrund; Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung der Korngrößenverteilung.
[49] DIN 18124 (1989): Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Bestimmung der Korngrößenverteilung; Kapillarpyknometer – Weithalspyknometer.
[50] DIN 18125 Teil 1 (1986): Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Bestimmung der Dichte des Bodens; Laborversuche.
[51] DIN 18125 Teil 2 (1986): Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Bestimmung der Dichte des Bodens; Feldversuche.
[52] DIN 18127 (1987): Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Proctorversuch.
[53] DIN 18128 (1990): Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Bestimmung des Glühverlustes.
[54] DIN 18129 (1990): Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Kalkgehaltsbestimmung.

Die Küste, 55 EAK (1993), 215-231

[55] DIN 18130 Teil 1 (1989): Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts; Laborversuche.
[56] DIN 18136 (1987): Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit; Einaxialversuch.
[57] DIN 18137 Teil 1 (1990): Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Bestimmung der Scherfestigkeit; Begriffe und grundsätzliche Versuchsbedingungen.
[58] DIN 18137 Teil 2 (1990): Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Bestimmung der Scherfestigkeit; Triaxialversuch.
[59] DIN 18196) (1988): Erd- und Grundbau; Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke.
[60] DIN 18300 (1988): Erdarbeiten. In: Verdingungsordnung für Bauleistungen (VOB), Teil C, Herausgegeben vom DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth, Berlin, 1988.
[61] DIN 18311 (1988): Naßbaggerarbeiten. In: Verdingungsordnung für Bauleistungen (VOB), Teil C, Herausgegeben vom DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth, Berlin.