

Brandenburgische Geowiss. Beitr.	Kleinmachnow	5 (1998), 1	S. 31 – 36	10 Abb., 6 Lit.
----------------------------------	--------------	-------------	------------	-----------------

Konstruktion und Bemessung von Hochwasserschutzdeichen

JÜRGEN RECHTERN

1. Einleitung

Bei der schweren Sturmflut im Februar 1962 an der deutschen Nordseeküste waren u. a. an den tidebeeinflussten Flüssen Elbe, Weser, Ems und Eider die vorhandenen alten, über Jahrhunderte aus Klei, Sanden und z. T. auch Geschiebeböden häufig sehr inhomogen aufgebauten Deiche mit sehr steilen Böschungen den extremen Beanspruchungen durch das ungewöhnlich hohe Hochwasser, insbesondere bei Überflutung, nicht gewachsen. Es gab zahlreiche Deichbrüche. Für die betroffenen Bundesländer Bremen, Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein ergab sich danach die Notwendigkeit, nicht nur die alten und sehr stark beschädigten Deiche kurzfristig wieder instand zu setzen, sondern diese nach neuen Erkenntnissen entsprechend zu verstärken und zu erhöhen.

Für Hamburg erforderte dieses die Neugestaltung der Hochwasserschutzlinie des öffentlichen Hochwasserschutzes (ASCHENBERG & KROKER 1992) auf rd. 100 km Länge mit rd. 77 km Hochwasserschutzdeichen und rd. 23 km Hochwasserschutzwänden bzw. sonstigen Bauwerken. In diesem Beitrag sollen am Beispiel der in Hamburg gebauten Hochwasserschutzdeiche wesentliche Aspekte der Konstruktion und Bemessung von Deichen an tidebeeinflussten Flüssen aufgezeigt werden.

2. Baugrund und Grundwasser

Eine wesentliche Grundlage für die Konstruktion und Bemessung von Deichen ist die Kenntnis über den unterhalb der Deichaufstandsfläche anstehenden Baugrund und die vorhandenen Grundwasserverhältnisse. Der Baugrund besteht im Hamburger Raum im Niederungsgebiet der Elbe vorwiegend aus holozänen Ablagerungen, bestehend aus organischen Weichschichten wie Klei, Torf, Mudden und Schlick, sowie aus Sanden, die z. T. in Wechselfolge und unterschiedlichen Schichtdicken anstehen (GRUBE 1971, RUCK 1971). Das gewachsene Gelände ist örtlich durch Sand- und Schlickaufspülungen künstlich aufgehöhht worden. Die Schichten des Holozäns werden in der Regel von pleistozänen Sanden größerer Mächtigkeit unterlagert.

Hinsichtlich der hydraulischen Randbedingungen ist der Baugrund in undurchlässigen, gemischt-durchlässigen und durchlässigen Boden (Abb. 1) zu unterscheiden. Das

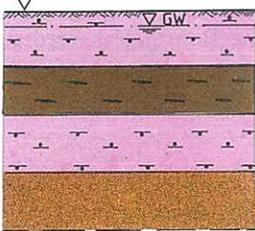
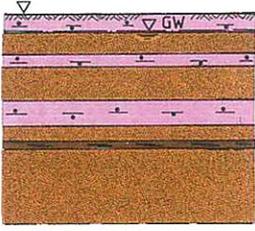
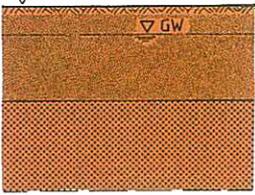
Profil	Wasserdurchlässigkeit
 <p>Klei Torf Klei Sand</p>	undurchlässig
 <p>Wechsellagerung: Klei / Sand Torf Sand</p>	gemischt durchlässig
 <p>Sand, holozän Sand, pleistozän</p>	durchlässig

Abb. 1
Schematisierter Baugrundaufbau

Grundwasser steht, ausgenommen örtliche Stauwasserstände im Bereich von Sandaufspülungen, bei einem mittleren Niveau um rd. NN +1 m, beeinflusst von der binnendeichs vorhandenen Vorflut, meistens nur wenige Dezimeter unterhalb der Geländeoberfläche an. In den Sanden unterhalb und innerhalb der organischen Weichschichten steht das Grundwasser gespannt an, wobei das Druckniveau gedämpft und zeitverzögert den Tidewasserständen in der Elbe folgt. Im Bereich von Hamburg liegt das mittlere Tidehochwasser (MThw) in der Elbe auf etwa NN +2,1 m und das mittlere Tideniedrigwasser auf etwa NN -1,3 m. Das bisher allerhöchste Tidehochwasser (HHThw) wurde im Jahr 1976 auf NN +6,45 m gemessen.

3. Baugrunduntersuchungen

Zur Beurteilung des Baugrundes und der Grundwasserverhältnisse sind Baugrunduntersuchungen gemäß Abbildung 2 erforderlich. Der dazu in der Deichtrasse erforderliche Baugrundaufschluß erfolgt entlang der Deichkrone sowie des außen- und binnenseitigen Deichfußes in einem genügend engen Raster mit einem Abstand der Aufschlußansatzpunkte in Längsrichtung von etwa 50 m - 100 m. Abhängig von der Mächtigkeit der anstehenden organischen Weichschichten beträgt die erforderliche Bohrtiefe etwa 10 m - 15 m, wobei die Bohrendteufe mindestens etwa 2 m bis in die ausreichend tragfähigen holozänen bzw. pleistozänen Sande reicht. Für die organischen Weichschichten wird die Anfangsscherfestigkeit (undräßierte Kohäsion c_u) durch in situ-Flügelsondierungen nach DIN 4096 über die Weichschichtmächtigkeit mit Abscherungen etwa alle 0,5 m ermittelt. Soweit erforderlich werden zur Ermittlung der Lagerungsverhältnisse der anstehenden Sande Druck- oder Rammsondierungen nach DIN 4094 durchgeführt. Einzelne Bohrungen werden zu Grundwassermeßstellen ausgebaut und zur Messung der tideabhängigen Grundwasserstände mit Pegelschreibern ausgestattet.

Für die anstehenden Bodenarten werden die maßgebenden Bodenkennwerte in Laborversuchen an aus den Bohrungen entnommenen Bodenproben ermittelt. An gestört entnommenen Bodenproben (Güteklasse 3 und 4 nach DIN 4021) werden ergänzend zur manuellen und visuellen Beurteilung Versuche zur Klassifikation und Zustandsbeschreibung durchgeführt. Dabei wird insbesondere an Proben aus den organischen Weichschichten der Wassergehalt nach DIN 18121, Teil 1, bestimmt, um auf der Grundlage vorliegender Erfah-

Baugrundaufschluß

- Baugrundsichtung (Bohrungen)
- Lagerungsverhältnisse nichtbindiger Böden (Druck- oder Rammsondierungen)
- Anfangsscherfestigkeit organischer Weichschichten (Flügelsondierungen)
- Grundwasserverhältnisse (Grundwassermeßstellen)

Bestimmung der Bodenkennwerte durch Laborversuche

- Versuche zur Klassifikation und Zustandsbeschreibung, wie
 - Korngrößenverteilung
 - Wassergehalt
 - Glühverlust
 - Fließ- und Ausrollgrenze
- Schwerversuche (φ' , c' , c_u)
- Kompressionsversuche (E_s , c_v)
- Wasserdurchlässigkeitsversuche (k)

Abb. 2
Schema Baugrunduntersuchungen

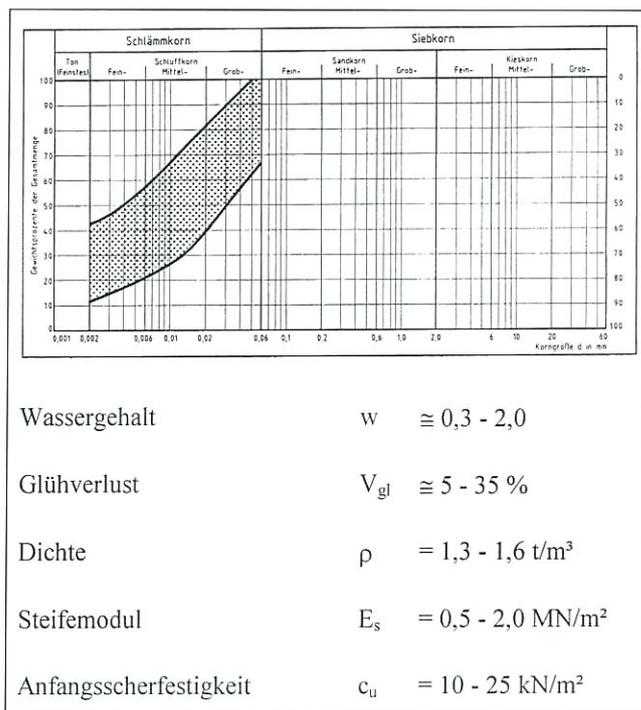


Abb. 3
Bodenkennwerte von Klei

ungswerte die Festigkeits- und Verformungseigenschaften dieser Böden abzuschätzen. Soweit erforderlich werden an weitgehend ungestört entnommenen Bodenproben (Güteklasse 1 nach DIN 4021) Scherversuche zur Bestimmung der effektiven Scherparameter φ' und c' sowie der undräßierten Kohäsion c_u und Kompressionsversuche zur Bestimmung der das Verformungsverhalten beschreibenden Kennwerte Steifemodul E_s und Konsolidierungsbeiwert c_v durchgeführt. Die Versuchsdurchführungen und -auswertungen richten sich nach den einschlägigen DIN-Vorschriften.

Die für den verbreitet anstehenden Klei wesentlichen bodenphysikalischen bzw. bodenmechanischen Kennwerte sind in Abbildung 3 zusammengestellt. Sofern der Klei entsprechende Qualitätsanforderungen erfüllt, wird er als Deichbaustoff (s. Abs. 5) verwendet.

4. Deichprofile

Bis zur Sturmflut im Februar 1962 mit einem bis dahin gemessenen höchsten Wasserstand von NN +5,70 m hatten die vorhandenen Deiche entlang der Elbe eine Kronenhöhe auf etwa NN +5,8 m. Die Kronenbreite betrug etwa 3 m und die Böschungen waren mit etwa 1 : 2 an der Wasserseite und etwa 1 : 1,5 an der Binnenseite sehr steil ausgebildet. Als Deichbaustoff war vorwiegend Klei verwendet worden. Die Deiche sind teilweise über eine Zeit von mehreren Jahrhunderten aufgebaut bzw. immer wieder verstärkt und nach aufgetretenen Deichbrüchen wieder instand gesetzt worden. Dabei sind außer Klei örtlich auch Sand sowie andere organische und bindige Böden wie Mudden, Schlick, Geschiebelehm und -mergel verwendet worden, so daß diese Deiche häufig sehr inhomogen aufgebaut waren.

Nach der Sturmflut im Februar 1962 wurden in Hamburg Deichprofile entwickelt (MEENEN & COUSIN 1964), die für einen seinerzeit festgelegten Bemessungswasserstand von etwa NN +6,7 m mit einer Kronenhöhe auf etwa NN +7,2 m ausreichend überflutungssicher und bei Böschungsneigungen von etwa 1 : 3 an der Wasser- und Binnenseite den Beanspruchungen durch Wellenangriff ausreichend Widerstand bieten. Durch Anordnung einer Deichverteidigungsstraße mit einem Lagerstreifen von insgesamt etwa 9,5 m Breite unmittelbar binnenseitig der Deichkrone ergab sich das in Abbildung 4 dargestellte Deichprofil. Bei der Gestaltung der Deichquerschnitte wurde ferner berücksichtigt, daß entlang der Hochwasser-

etwa 30 m an einen Binnendeichgraben angeschlossen ist, wird die notwendige Vorflut für den Sandkern bei ablaufendem Hochwasser bzw. zu jedem Zeitpunkt erreicht.

Nach neueren Untersuchungen in den 80er Jahren (ASCHEBERG & KROKER 1992) wurde eine Bemessungsturmflut unter Berücksichtigung der Einwirkungen des Windes bzw. der von diesem erzeugten Wellen entwickelt, die für die Deiche entlang der Elbe im Bereich von Hamburg zu Bemessungswasserständen zwischen etwa NN +7,0 m und NN +7,8 m geführt hat. Zur Ermittlung der Sollhöhe eines einzelnen Deichabschnittes werden abhängig von dessen Ausrichtung zum Wind unterschiedliche

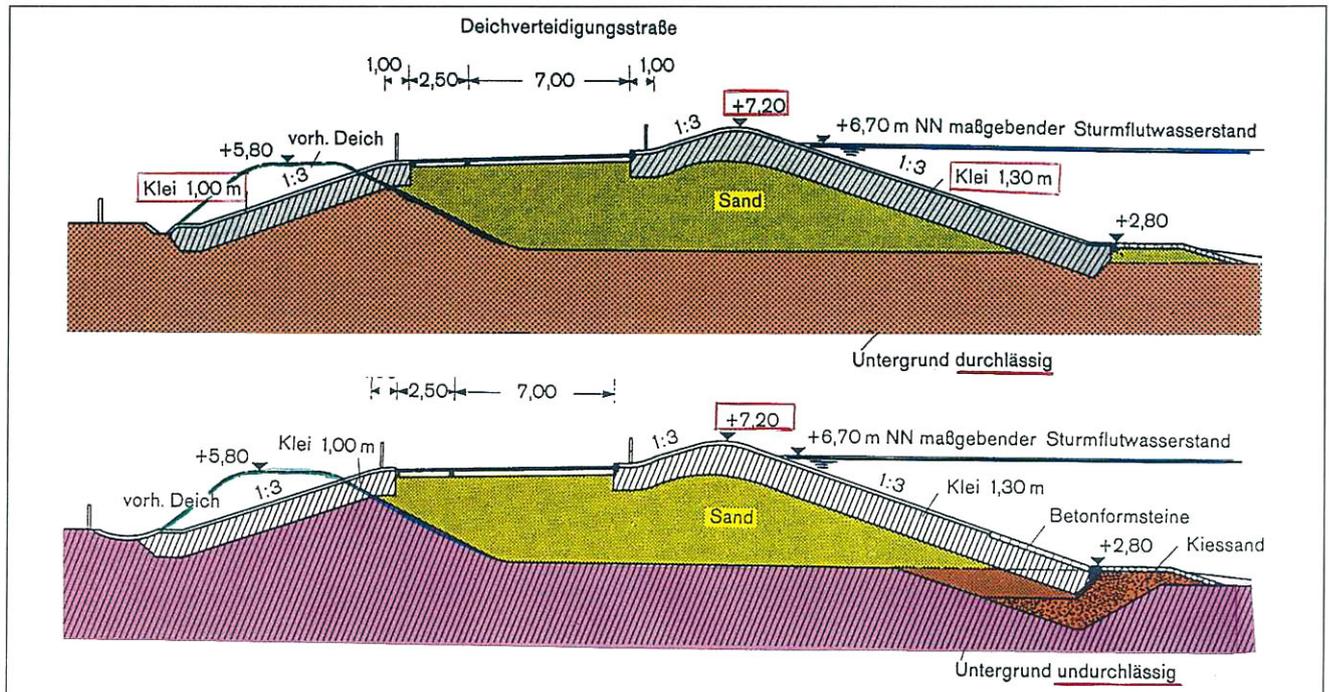


Abb. 4
Hamburger Deichprofile nach 1962

schutzlinie die Gründung der Deiche auf sehr unterschiedlichem Baugrund (s. Abs. 2) erfolgen mußte. Wesentliche Einflußfaktoren waren dabei die große Zusammendrückbarkeit und geringe Scherfestigkeiten der teilweise mächtigen organischen Weichschichten und die unterschiedlichen hydraulischen Randbedingungen. Bei der Wahl der Deichbaumaterialien waren die hohen bodenmechanischen Anforderungen an einen schnell zu errichtenden Deich großer Höhe und die zur Verfügung stehenden Bodenarten zu berücksichtigen. Dieses führte zu der Bauweise von Deichen mit einem Stützkörper aus Sand und einer oberflächigen Abdichtung aus Klei.

Soweit möglich wurden die alten Deiche in die neuen Deiche integriert (s. Abb. 4). Bei einem Deich auf undurchlässigem bzw. gemischt durchlässigem Baugrund wird durch eine Deichkernentwässerung sichergestellt, daß sich im Stützkörper aus Sand kein unzulässiger Wasserdruck aufbauen kann. Mittels eines am Außendeichfuß angeordneten Fußfilters, wie beispielhaft in Abbildung 4 dargestellt, oder mittels eines Längsfilters im Sandkern, der über Querfilter im Abstand von

Zuschläge erforderlich. Mit diesen ergeben sich erforderliche Kronenhöhen zwischen etwa NN +8,0 m und NN +8,5 m. Zur Anpassung an diese Höhen werden in einem z. Z. laufenden Bauprogramm der Freien und Hansestadt Hamburg die bestehenden Deiche um im Mittel etwa 1,0 m erhöht. Soweit im Zuge dieses Bauprogrammes für aus ökologischen Gründen vorgesehene Deichrückverlegungen ein vollständiger Deichneubau erforderlich ist, wird ein Regelquerschnitt realisiert, wie er beispielhaft in Abbildung 5 für einen Deich auf durchlässigem Untergrund dargestellt ist. Die vielfach nur möglichen wasserseitigen Deichverstärkungen orientieren sich an diesem Regelquerschnitt hinsichtlich der auf der Wasserseite mindestens erforderlichen Kleiabdeckung von etwa 1,5 m Dicke und dem bis auf etwa NN +6,0 m hochgezogenen Deckwerk.

5. Deichbaustoffe

Für den Sandkern des Deiches werden gut verdichtungsfähige Sande SE, SW nach DIN 18196 verwendet. Der als Böschungsabdeckung einzubauende Klei muß die Quali-

tätsanforderungen hinsichtlich Korngrößenverteilung, Glühverlust V_{gl} , Plastizitätszahl I_p und Einbauwassergehalt w gemäß Abbildung 6 erfüllen. Der Klei muß ferner frei von Fremdstoffen, wie z. B. Wurzelreste, Bauschutt oder Holzpfähle sein. Eine Vermischung der Kleies mit Sand ist zu vermeiden.

Der Klei ist lagenweise einzubauen und so zu verdichten, daß eine weitgehend homogene und hohlraumfreie Böschungsabdeckung erzielt wird. Die Einbaudicke ist abhängig von der Tiefenwirkung der eingesetzten Verdichtungsgeräte zu wählen. Wegen der großen Bandbreite der Bodenkennwerte der zum Einbau zur Verfügung stehen-

Die Verdichtungsanforderungen gemäß Abbildung 7 haben daher im wesentlichen das Ziel, eine homogene und hohlraumfreie Böschungsabdeckung herzustellen, die dem Wellenangriff aufgrund ausreichender Dichte und Festigkeit (abhängig von Plastizität und Einbauwassergehalt) des Kleies einen möglichst hohen Erosionswiderstand bildet.

Durch die Begrünung der Kleiabdeckung mit Gras und deren regelmäßige Pflege (z. B. Beweidung durch Schafe) wird der Erosionswiderstand noch erhöht und dauerhaft sichergestellt.

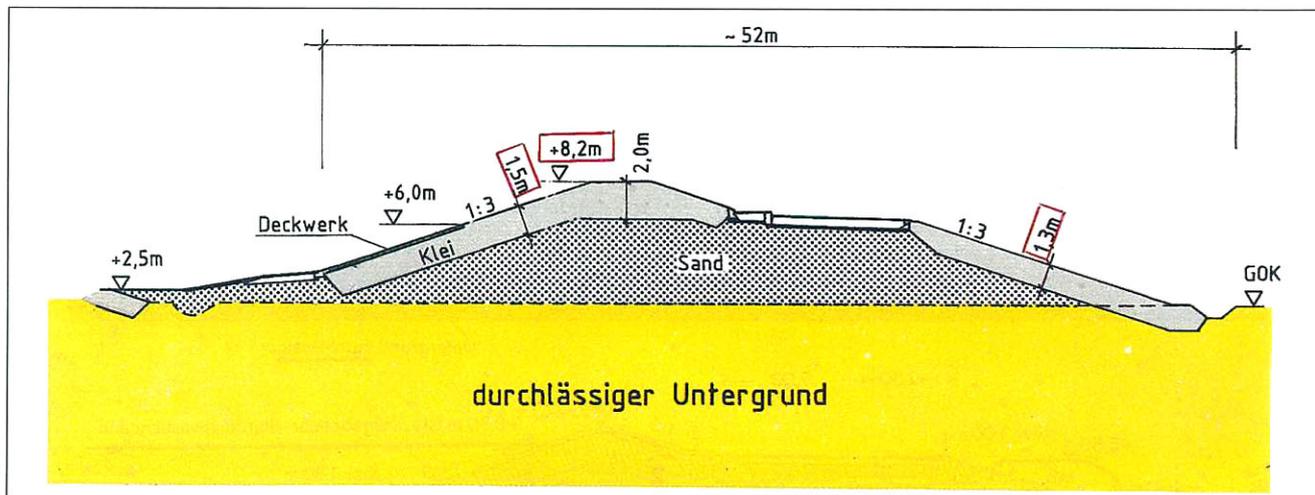


Abb. 5
Regelquerschnitt auf durchlässigem Untergrund

den Kleiböden (s. Abb. 3) lassen sich die Verdichtungsanforderungen nicht durch eine konstante Proctordichte ρ_{pr} bei optimalem Wassergehalt w_{pr} oder einen bestimmten Mindestwert der Trockendichte ρ_d abhängig vom Sättigungsgrad S_r definieren. Dabei ist auch zu berücksichtigen, daß bei den Profilen der heutigen Deiche gemäß Abschnitt 4 mit relativ flachen Böschungsneigungen eine Verdichtung des Kleies aus Standsicherheitsgründen kaum gefordert werden muß.

Sandanteil ($d > 0,06 \text{ mm}$)	< 40 %
Höherer Sandanteil nur bei I_p	> 0,10
Tonanteil ($d < 0,002 \text{ mm}$)	> 10 %
	< 40 %
Glühverlust	V_{gl} < 10 % (max. 15 %)
Plastizität optimal $I_p = 0,20 - 0,35$	I_p > 0,10
Einbauwassergehalt	w > 0,20
	< 0,40

Abb. 6
Deichbaustoff Klei – Qualitätsanforderungen

Verdichtungsgrad	
bei $w \approx w_{pr}$	$\rho_d \geq 0,93 \cdot \rho_{pr}$
$w > w_{pr}$	$\rho_d \geq \min \rho_d$ bei $S_r = 0,98$
Einbauschichtdicke	$d \geq 30 \text{ cm}$
Anzahl Verdichtungsübergänge	$n \geq 3$
Arbeitsplanum mit Gefälle	
Arbeitsunterbrechung bei Regen	

Abb. 7
Deichbaustoff Klei – Verdichtungsanforderungen

6. Standsicherheitsuntersuchungen

Der Nachweis der Standsicherheit eines Deiches erfolgt heute nach vorhandenen verschiedenen Regelwerken (DVWK 1986, EAK 1993 und DIN). Die für den Nachweis der statischen Sicherheit erforderlichen erdstatischen Berechnungen sind in Abbildung 8 angegeben. Für den Nachweis der hydraulischen Sicherheit sind die in Abbildung 9 angegebenen Untersuchungen durchzuführen bzw. sind beim Entwurf entsprechende konstruktive Maßnahmen zu berücksichtigen.

Böschungsbruchberechnung

- Allgemeine Standsicherheit nach DIN 4084 (ggf. nicht kreisförmige Gleitflächen)
- Berücksichtigung Strömungskräfte (Bemessungshochwasser, fallender Wasserspiegel)
- Anfangszustand (c_v) und Endzustand (φ' , c')

Spreizspannungen im Dammlager

- Berechnung nach RENDULIC

Abheben und Abrutschen der Abdeckung

Setzungsberechnungen

- Grundlage für Überhöhung Deichkrone
- Beurteilung der Rißsicherheit (Setzungsunterschiede oder Gewölbefbildungen im Anschluß an Bauwerke)

Abb. 8
Deichstandsicherheit – Nachweis statische Sicherheit

Die im Einzelfall erforderlichen rechnerischen Nachweise sind abhängig von den auf den Deichkörper und Deichuntergrund einwirkenden Beanspruchungen, insbesondere bei einem Hochwasserereignis, festzulegen. Anwendung finden dabei in der Regel die bekannten Berechnungsverfahren der Bodenmechanik, auf die hier verwiesen wird (z. B. RECHTERN 1994).

Erosion der luftseitigen Böschung

- Vermeidung von austretendem Sickerwasser (Böschungneigung $1 : n \leq 1 : 3$)
- Auflastfilter oder Erosionsschutzfilter

Suffusion, Kontakterosion, Erosionsgrundbruch

- Vermeidung von Kornumlagerungen durch Sickerströmung (kritisch bei hohen hydraulischen Gradienten, ungleichförmiger oder intermittierender Korngrößenverteilung und lockerer Lagerung)
- Einhaltung von Gefällegrenzwerten, z. B. nach ISTOMINA

Hydraulischer Grundbruch bzw. Auftriebssicherheit

- Vermeidung von Quellbildungen landseitig bei oberflächlich dünner Deckschicht
- Druckentlastung am landseitigen Böschungsfuß
- Belastung am landseitigen Böschungsfuß zur Aufnahme des Überdrucks

Abb. 9
Deichstandsicherheit – Nachweis hydraulische Sicherheit

7. Interaktion Standsicherheit - Entwurf und Bau

Die Ergebnisse der Standsicherheitsuntersuchungen gemäß Abschnitt 6 stehen abhängig von den örtlich vorliegenden Untergrundverhältnissen in einer engen Wechselbeziehung zum Deichentwurf und Deichbau. Die verschiedenen Einflußfaktoren gehen aus Abbildung 10 hervor.

Durch die Profilgestaltung mit einer dem maßgebenden Bemessungswasserstand ausreichenden Deichhöhe und den gewählten relativ flachen Böschungsneigungen ist ein hohes Maß an Überflutungssicherheit bei Sturmflut gegeben. Im Einzelfall können auch Maßnahmen zur Untergrundverbesserung (z. B. Bodenaustausch, Konsolidationsbeschleunigung) erforderlich werden. Zu erwartende Setzungen, die sich abhängig von der Mächtigkeit und den Verformungseigenschaften unterhalb der Deichaufstandsfläche anstehender organischer Weichschichten in voller Größe erst über einen langen Zeitraum einstellen, werden

Profilgestaltung

- Böschungsneigungen
- Entwässerungs-/Grundwasserentspannungsmaßnahmen
- Material und Dicke der Böschungsabdeckungen
- Wasserseitiges Deckwerk

Deichbaustoffe

- Eignungsprüfungen
- Verdichtungsanforderungen

Untergrundverbesserung

Deichüberhöhung

Bauablauf

Qualitätskontrollen

- Eigenschaften der Deichbaustoffe
- Verdichtungsprüfungen
- Prüfung der Entwässerungseinrichtungen
- Setzungsmessungen
- Neigungsmessungen

Abb. 10
Einflußfaktoren beim Entwurf und Bau eines Deiches

durch eine entsprechende Deichüberhöhung berücksichtigt. Für den Sandkern und die Kleiabdeckung werden Materialien mit definierten Qualitätsanforderungen verwendet. Die Materialien werden mit geeignetem Gerät eingebaut und nach hohen Anforderungen verdichtet, so daß Eigensetzungen des Deichkörpers bereits weitgehend während der Bauzeit eintreten. Die ausreichende Verdichtung wird durch baubegleitende Verdichtungskontrollen sichergestellt, so daß keine Sicherheitsrisiken im Deichkörper

selber liegen. Ab Baubeginn wird das Setzungsverhalten des Deiches mittels geodätischer Messungen überprüft. Im Einzelfall werden gesonderte Prüfungen (Funktionsfähigkeit von Entwässerungseinrichtungen, Neigungsmessungen) durchgeführt.

Literatur

- ASCHENBERG, H. & G. KROKER (1992): Sturmfluten und Hochwasserschutz in Hamburg. - 64 S., Baubehörde der Freien und Hansestadt Hamburg und Architekten- und Ingenieur-Verein Hamburg e.V., Hamburg.
- GRUBE, F. (1971): Baugeologie der Lockergesteine im weiteren Hamburger Raum. - Grundbautaschenbuch, Band I, Ergänzungsband, S. 109-160, Ernst & Sohn, Berlin.
- MEENEN, K. & B. COUSIN (1964): Untersuchungen zur Profilgestaltung der Hamburger Deiche. - Wasser und Boden 16, S. 258-262, Lindow & Co., Hamburg.
- RECHTERN, J. (1994): Standsicherheit von Deichen. - Berichte aus der Wasserwirtschaft Nr. 2, Berücksichtigung des Naturschutzes beim Deichbau, S. 45-56, Baubehörde Hamburg, Amt für Wasserwirtschaft, Hamburg.
- RUCK, K.-W. (1971): Baugeologie der Lockergesteine im Nord- und Ostseeraum. - Grundbautaschenbuch, Band I, Ergänzungsband, S. 161-217, Ernst & Sohn, Berlin.
- DIN 19712 (1997): Flußdeiche. - 32 S., Beuth, Berlin.
- DVWK Merkblatt 210 (1986): Flußdeiche. - 48 S., Parey, Hamburg.
- EAK (1993): Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken. - Die Küste, Heft 55, 553 S., Boyens, Heide.

Anschrift des Autors:

Dr.-Ing. Jürgen Rechtern
Grundbauingenieure Steinfeld und Partner GbR
Alte Königstraße 3
22767 Hamburg