

Arbeitsausschuss „Ufereinfassungen“  
der HTG e. V. (Hrsg.)

# Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen EAU 2020

- unverzichtbare Hilfe in der Planungspraxis
- normenähnlicher Charakter
- die Empfehlungen werden auch in Ausschreibungen und Abrechnungen verwendet

Die 12. Auflage „EAU“ 2020 beinhaltet eine inhaltliche Neustrukturierung der Empfehlungen. Diese gelten für Planung, Entwurf, Ausschreibung, Vergabe, Baudurchführung, -überwachung sowie bei Abnahme und Abrechnung von Hafen- und Wasserstraßenanlagen.

## BESTELLEN

+49 (0)30 470 31-236

marketing@ernst-und-sohn.de

www.ernst-und-sohn.de/3316



vorl. Abb.

11 / 2020 · ca. 700 Seiten ·  
ca. 150 Abbildungen · ca. 60 Tabellen

Hardcover

ISBN 978-3-433-03316-6 ca. € 129\*

eBundle (Print + PDF)

ISBN 978-3-433-03317-3 ca. € 169\*

**Bereits vorbestellbar.**

## ÜBER DAS BUCH

Die 12. Auflage der „EAU 2020“ beinhaltet eine inhaltliche Straffung und Neustrukturierung der Empfehlungen mit dem Ziel einer verbesserten und verständlicheren Kapitelstruktur. Außerdem wurden die seit dem Erscheinen der 11. Ausgabe der Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ veröffentlichten Technischen Jahresberichte in die Empfehlungen eingearbeitet. Die Empfehlungen berücksichtigen weiterhin die neue Normengeneration, bestehend aus Eurocode 7, zugehörigen nationalen Anwendungsdokumenten und ergänzenden nationalen Regelungen (DIN 1054:2010).

In Einzelfällen werden Teilsicherheitsbeiwert EAUfr und von Praxiserfahrungen abweichend festgelegt. Der Sicherheitsstandard der See- und Hafenbauwerke bleibt somit erhalten, die Empfehlungen genügen weiterhin dem Anspruch auf internationale Anerkennung und Anwendung bei Planung, Entwurf, Ausschreibung, Vergabe, Baudurchführung und Überwachung sowie bei Abnahme und Abrechnung von Hafen- und Wasserstraßenanlagen nach einheitlichen Gesichtspunkten.

## BESTELLUNG

Anzahl	ISBN /	Titel	Preis
	978-3-433-03316-6	Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen EAU 2020	ca. € 129*
	978-3-433-03317-3	Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen EAU 2020 – eBundle (Print + PDF)	ca. € 169*

Privat

Geschäftlich

Bitte richten Sie Ihre Bestellung an:

Tel. +49 (0)30 47031-236

Fax +49 (0)30 47031-240

marketing@ernst-und-sohn.de

Firma

UST-ID Nr.

Name, Vorname

Telefon

Fax

Straße, Nr.

PLZ/Ort/Land

E-Mail

www.ernst-und-sohn.de/3316

Datum/Unterschrift

## Vorwort

Acht Jahre sind seit der 11. Ausgabe der Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufer-einfassungen“ vergangen. In dieser Zeit sind Neuerungen in den jährlichen und teilweise halbjährlichen Technischen Jahresberichten der Jahre 2013–2019 veröffentlicht worden. Nun liegt mit der 12. Auflage eine vollständig fortgeschriebene, in Fachkreisen nur kurz EAU genannte, Fassung des Empfehlungswerks des von der Hafentechnischen Gesellschaft (HTG) und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) gemeinsam getragenen Ausschusses „Ufer-einfassungen“ vor. Ich bin sicher, dass auch diese Auflage wieder zum Standardwerk eines jeden im Hafenbau tätigen Ingenieurs wird.

Historisch gewachsen bildeten die Empfehlungsnummern über viele Jahre die Grundlage zur Orientierung in der EAU. Mit der EAU 2020 erwartet Sie eine inhaltliche Straffung und Neustrukturierung der Empfehlungen mit dem Ziel einer verbesserten und verständlicheren Kapitelstruktur. Die Empfehlungsnummern werden Sie in der 12. Auflage der EAU somit nicht mehr finden. Darüber hinaus wurden bereits in den Jahresberichten des Ausschusses „Ufer-einfassungen“ von 2013–2019 veröffentlichte technische Neuerungen eingearbeitet. Diese betreffen die Themen vertikale Tragfähigkeit, Pollerzug, Offshorebasishäfen und Schiffsgößen. Außerdem wurden Empfehlungen zu RoRo-Anlegern und Anlegebrücken aufgenommen.

Die Zusammensetzung des Ausschusses „Ufer-einfassungen“ orientiert sich an dem vom Deutschen Institut für Normung (DIN) fixierten Grundsatz der angemessenen Vertretung aller interessierten Kreise bzw. des vorhandenen Sachverstandes. Der Ausschuss setzt sich daher aus allen maßgeblichen Fachrichtungen der Technischen Hochschulen, der Bauverwaltungen der großen See- und Binnenhäfen sowie der Bundeswasserstraßen, der Bauindustrie, der Stahlindustrie und der Ingenieurbüros zusammen.

An den Arbeiten zur EAU 2020 waren folgende aktive und ehemalige Mitglieder des Arbeitsausschusses beteiligt:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Grabe, Hamburg (Vorsitzender seit 2009)

Ir. Tom van Autgaerden, Antwerpen

Dr.-Ing. Karsten Beckhaus, Schrobenshausen

Ir. Erik J. Broos, Rotterdam

Dipl.-Ing. Frank Feindt, Hamburg

Dipl.-Ing. Francois Gaasch, Esch-sur-Alzette

Ir. Leon A. M. Groenewegen, The Hague

Dr.-Ing. Michael Heibaum, Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Stefan Heimann, Berlin

Dipl.-Ing., M.Eng.Sc. Sebastian Höhmann, Hamburg

Prof. Ir. Aad van der Horst, Delft  
Dipl.-Ing. Robert Howe, Bremerhaven  
Dipl.-Ing. Hans-Uwe Kalle, Hagen  
Dr.-Ing. Jan Kayser, Karlsruhe  
Dr.-Ing. Karl Morgen, Hamburg  
Dipl.-Ing. Hendrik Neumann, Hamburg  
Dipl.-Ing. Matthias Palapys, Duisburg  
Dipl.-Ing. Gabriele Peschken, Bonn  
Dipl.-Ing. Torsten Retzlaff, Rostock  
Dr.-Ing. Peter Ruland, Hamburg  
Dr.-Ing. Hartmut Tworuschka, Hamburg

Analog zu den Festlegungen des DIN zum Zustandekommen einer Norm werden die neu erarbeiteten Empfehlungen als vorläufige Empfehlung über die Technischen Jahresberichte zur öffentlichen Erörterung gestellt. Sie werden nach Berücksichtigung eventueller Einsprüche im folgenden Technischen Jahresbericht endgültig veröffentlicht. Die Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ – Häfen und Wasserstraßen können daher dem Status einer Norm gleichgesetzt werden. Unter dem Blickwinkel des Praxisbezugs und auch der Weitergabe von Erfahrungen werden über den Inhalt einer Norm hinausgehende Aussagen getroffen, die mit dem Begriff „code of practice“ beschrieben werden können.

Die 12. Auflage der EAU erfüllt mit der nunmehr abgeschlossenen Einarbeitung des europäischen Normungskonzepts die Anforderungen an eine Notifizierung durch die EU-Kommission. Sie ist unter der Notifizierungsnummer 2019/655/D bei der EU-Kommission eingetragen.

Die grundlegenden Überarbeitungen der EAU 2020 machten auch eine inhaltliche Diskussion mit Fachkollegen außerhalb des Ausschusses bis hin zur Einrichtung vorübergehender Arbeitskreise zu speziellen Themen erforderlich. Der Ausschuss bedankt sich bei allen Fachkollegen, die auf diese Weise wesentlich zur inhaltlichen Entwicklung der EAU 2020 beigetragen haben.

Außerdem sind zahlreiche Beiträge aus der Fachwelt sowie Empfehlungen anderer Ausschüsse und internationaler technisch-wissenschaftlicher Vereinigungen in die Empfehlungen eingeflossen.

Mit diesen Beiträgen und den Überarbeitungsergebnissen entspricht die EAU 2020 dem heutigen internationalen Standard. Damit stehen der Fachwelt in einer an die europäische Normung angepassten und aktualisierten Fassung auch künftig wertvolle Hilfen für Entwurf, Ausschreibung, Vergabe, technische Bearbeitung, wirtschaftliche und umweltverträgliche Bauausführung, Bauüberwachung, Vertragsabwicklung, Betrieb, Unterhaltung und Instandsetzung zur Verfügung, sodass Hafen- und Wasserstraßenbauten nach neuestem Stand der Technik und nach einheitlichen Bedingungen erstellt werden können.

Der Arbeitsausschuss dankt allen, die durch Beiträge und Anregungen zur vorliegenden Fassung beigetragen haben und wünscht der EAU 2020 die gleiche Resonanz wie ihren früheren Auflagen.

Ebenfalls möchte ich mich bei Frau Anne Stark, M.Sc. bedanken, die die Ausschussarbeit seit einiger Zeit begleitet.

Ein weiterer Dank gilt dem Verlag Ernst & Sohn für die gute Zusammenarbeit, die sorgfältige Bearbeitung der zahlreichen Abbildungen, Tabellen und Formeln sowie die wieder hervorragende Qualität in Druck und Aufmachung der EAU 2020.

Hamburg, Oktober 2020

Univ.-Prof. Dr.-Ing. *Jürgen Grabe*

## Inhaltsverzeichnis

### Vorwort *V*

<b>1</b>	<b>Sicherheits- und Nachweiskonzept</b>	<i>1</i>
1.1	Grundlagen des Sicherheits- und Nachweiskonzepts für Ufereinfassungen	<i>1</i>
1.1.1	Allgemeines	<i>1</i>
1.1.2	Normative Regelungen für Ufereinfassungen	<i>1</i>
1.1.3	Geotechnische Kategorien	<i>2</i>
1.1.4	Bemessungssituationen	<i>3</i>
1.2	Nachweise für Ufereinfassungen	<i>4</i>
1.2.1	Grundlagen für die Nachweisführung	<i>4</i>
1.2.2	Nachweisverfahren	<i>4</i>
1.2.3	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	<i>5</i>
1.2.4	Grenzzustand der Tragfähigkeit	<i>6</i>
	Literatur	<i>10</i>
<b>2</b>	<b>Schiffsabmessungen</b>	<i>13</i>
2.1	Seeschiffe	<i>13</i>
2.1.1	Fahrgast- und Kreuzfahrtschiffe	<i>13</i>
2.1.2	Massengutfrachter – Bulk Carrier	<i>14</i>
2.1.3	Stückgutfrachter – General Cargo	<i>15</i>
2.1.4	Containerschiffe	<i>15</i>
2.1.5	Fährschiffe	<i>15</i>
2.1.6	RoRo/ConRo-Schiffe	<i>15</i>
2.1.7	Öltanker	<i>16</i>
2.1.8	Gastanker	<i>17</i>
2.2	Binnenschiffe	<i>17</i>
2.3	Offshoreinstallationsschiffe	<i>21</i>
<b>3</b>	<b>Geotechnische Grundlagen</b>	<i>23</i>
3.1	Geotechnischer Bericht	<i>23</i>
3.2	Baugrund	<i>23</i>
3.2.1	Mittlere charakteristische Werte von Bodenkenngrößen	<i>23</i>
3.2.2	Anordnung und Tiefe von Bohrungen und Sondierungen	<i>24</i>
3.2.3	Ermittlung der Scherfestigkeit $c_u$ wassergesättigter, undrännierter, bindiger Böden	<i>31</i>
3.2.4	Beurteilung des Baugrunds für das Einbringen von Spundbohlen und Pfählen und Auswahl des Einbringverfahrens	<i>33</i>

- 3.2.5 Einteilung des Baugrunds in Homogenbereiche 36
- 3.3 Wasserdruck 38
  - 3.3.1 Allgemeines 38
  - 3.3.2 Resultierender Wasserdruck in Richtung Wasserseite 38
  - 3.3.3 Resultierender Wasserdruck auf Kaimauern vor überbauten Böschungen im Tidegebiet 41
  - 3.3.4 Berücksichtigung der Grundwasserströmung 42
- 3.4 Hydraulischer Grundbruch 49
- 3.5 Erddruck 52
  - 3.5.1 Allgemeines 52
  - 3.5.2 Ansatz der Kohäsion in bindigen Böden 53
  - 3.5.3 Ansatz der scheinbaren Kohäsion (Kapillarkohäsion) im Sand 53
  - 3.5.4 Ermittlung des Erddrucks bei einer gepflasterten steilen Böschung eines teilgeböschten Uferausbaus 53
  - 3.5.5 Ermittlung der Erddruckabschirmung auf eine Wand unter einer Entlastungsplatte bei mittleren Geländeaufasten 56
  - 3.5.6 Erddruckverteilung unter begrenzten Lasten 57
  - 3.5.7 Ermittlung des aktiven Erddrucks bei wassergesättigten nicht bzw. teilkonsolidierten, weichen, bindigen Böden 58
  - 3.5.8 Auswirkung von Wasserüberdruck unter Gewässersohlen 60
  - 3.5.9 Ansatz von Erddruck und resultierendem Wasserdruck und konstruktive Hinweise für Ufereinfassungen mit Bodenaustausch und verunreinigter oder gestörter Baggergrubensohle 61
  - 3.5.10 Einfluss des strömenden Grundwassers auf resultierenden Wasserdruck, Erddruck und Erdwiderstand 64
  - 3.5.11 Bestimmung des Verschiebungswegs für die Mobilisierung des Erdwiderstands in nichtbindigen Böden 66
  - 3.5.12 Maßnahmen zur Vergrößerung des Erdwiderstands vor Ufereinfassungen 67
  - 3.5.13 Erdwiderstand vor Geländesprüngen in weichen, bindigen Böden bei schneller Belastung auf der Landseite 69
  - 3.5.14 Ufereinfassungen in Erdbebengebieten 69
- Literatur 74
- 4 Belastungen auf Ufereinfassungen 77**
  - 4.1 Anlegegeschwindigkeit und Anlegedruck von Schiffen 77
    - 4.1.1 Richtwerte 77
    - 4.1.2 Belastung der Ufereinfassungen durch Reaktionskräfte aus Fendern 78
  - 4.2 Lotrechte Nutzlasten 78
    - 4.2.1 Allgemeines 78
    - 4.2.2 Grundfall 1 80
    - 4.2.3 Grundfall 2 80
    - 4.2.4 Grundfall 3 80
    - 4.2.5 Lastansätze auf Kaiflächen 80
  - 4.3 Seegang und Wellendruck 81
    - 4.3.1 Allgemeines 81
    - 4.3.2 Beschreibung des Seegangs 81
    - 4.3.3 Ermittlung der Seegangparameter 82

4.3.4	Bemessungskonzepte und Festlegung der Bemessungsparameter	87
4.3.5	Umformung des Seegangs	88
4.3.6	Wellendruck auf senkrechte Uferwände im Küstenbereich	90
4.4	Auswirkungen von Wellen aus Schiffsbewegungen	95
4.4.1	Allgemeines	95
4.4.2	Wellenhöhen	95
4.5	Wahl einer größeren Entwurfstiefe (Kolkzuschlag)	99
4.6	Lasten aus Schwall- und Sunkwellen infolge Wasserein- bzw. -ableitung	99
4.6.1	Allgemeines	99
4.6.2	Ermittlung der Wellenwerte	100
4.6.3	Lastansätze	100
4.7	Wellendruck auf Pfahlbauwerke	101
4.7.1	Allgemeines	101
4.7.2	Berechnungsverfahren nach Morison et al. (1950)	103
4.7.3	Ermittlung der Wellenlasten an einem senkrechten Einzelpfahl	104
4.7.4	Beiwerte $C_D$ und $C_M$	105
4.7.5	Kräfte aus brechenden Wellen	106
4.7.6	Wellenbelastung bei Pfahlgruppen	106
4.7.7	Geneigte Pfähle	107
4.7.8	Sicherheitsbeiwerte	108
4.7.9	Vertikale Wellenbelastung (Wave Slamming)	108
4.8	Vertäute Schiffe und deren Einflüsse auf die Bemessung von Vertäu- und Fendereinrichtungen	113
4.8.1	Allgemeines	113
4.8.2	Maßgebende Windgeschwindigkeit	113
4.8.3	Windlasten auf das vertäute Schiff	114
4.8.4	Belastung von Vertäu- und Fendereinrichtungen	115
4.9	Belastung von Pollern	116
4.9.1	Belastung von Pollern für Seeschiffe	116
4.9.2	Belastung von Pollern für Binnenschiffe	118
4.9.3	Richtung der Pollerzuglast	118
4.9.4	Bemessung für Pollerzuglasten	119
4.10	Kabelbelastung durch Krane und anderes Umschlaggerät	119
4.10.1	Übliche Stückguthafenkrane	119
4.10.2	Containerkrane	119
4.10.3	Lastangaben für Hafenkrane	120
4.10.4	Hinweise	121
4.11	Eisstoß und Eisdruck auf Ufereinfassungen, Fenderungen und Dalben im Küstenbereich	122
4.11.1	Allgemeines	122
4.11.2	Bestimmung der Eisdruckfestigkeit	123
4.11.3	Eislasten auf Ufereinfassungen und andere Bauwerke größerer Ausdehnung	124
4.11.4	Eislast auf lotrechte Pfähle	126
4.11.5	Waagerechte Eislast auf Pfahlgruppen	127
4.11.6	Eisauflast	127
4.11.7	Vertikallasten bei steigendem oder fallendem Wasserspiegel	128

- 4.12 Eisstoß und Eisdruck auf Ufereinfassungen, Pfeiler und Dalben im Binnenbereich 129
  - 4.12.1 Allgemeines 129
  - 4.12.2 Eisdicken 129
  - 4.12.3 Eisdruckfestigkeit 130
  - 4.12.4 Eislasten auf Ufereinfassungen und andere Bauwerke größerer Ausdehnung 130
  - 4.12.5 Eislasten auf schmale Bauwerke (Pfähle, Dalben, Brücken- und Wehrpfeiler, Eisabweiser) 131
  - 4.12.6 Eislast auf Bauwerksgruppen 131
  - 4.12.7 Vertikallasten bei steigendem oder fallendem Wasserspiegel 131
- Literatur 132

**5 Erdarbeiten und Baggerungen 137**

- 5.1 Baggerarbeiten vor Uferwänden in Seehäfen 137
- 5.2 Bagger- und Aufspültoleranzen 138
  - 5.2.1 Allgemeines 138
  - 5.2.2 Baggertoleranzen 139
- 5.3 Aufspülen von Hafengelände 141
  - 5.3.1 Allgemeines 141
  - 5.3.2 Aufspülen von Hafengelände über dem Wasserspiegel 142
  - 5.3.3 Aufspülen von Hafengelände unter dem Wasserspiegel 143
- 5.4 Hinterfüllen von Ufereinfassungen 146
  - 5.4.1 Allgemeines 146
  - 5.4.2 Hinterfüllen im Trockenem 146
  - 5.4.3 Hinterfüllen unter Wasser 146
  - 5.4.4 Ergänzende Hinweise 147
- 5.5 Lagerungsdichte von aufgespülten, nichtbindigen Böden 147
  - 5.5.1 Allgemeines 147
  - 5.5.2 Erfahrungswerte der Lagerungsdichte 148
  - 5.5.3 Erforderliche Lagerungsdichte für Hafenflächen 148
  - 5.5.4 Überprüfung der Lagerungsdichte 148
- 5.6 Lagerungsdichte von verklappten, nichtbindigen Böden 149
  - 5.6.1 Allgemeines 149
  - 5.6.2 Einflüsse auf die erzielbare Lagerungsdichte 150
- 5.7 Baggern von Unterwasserböschungen 150
  - 5.7.1 Allgemeines 150
  - 5.7.2 Baggern von Unterwasserböschungen in lockerem Sand 151
  - 5.7.3 Baggergeräte 151
  - 5.7.4 Ausführung der Baggerarbeiten 151
- 5.8 Sackungen nichtbindiger Böden 153
- 5.9 Ausführung von Bodenaustausch in der Rammtrasse von Ufereinfassungen 154
  - 5.9.1 Allgemeines 154
  - 5.9.2 Bodenaushub 155
  - 5.9.3 Säubern der Baggergrubensohle vor dem Sandeinbau 156
  - 5.9.4 Einbau des Sandes 157
  - 5.9.5 Kontrolle des Sandeinbaus 157

- 5.10 Bodenverdichtung mit schweren Fallgewichten (dynamische Intensivverdichtung) 158
- 5.11 Vertikaldräns zur Beschleunigung der Konsolidierung weicher, bindiger Böden 158
  - 5.11.1 Allgemeines 158
  - 5.11.2 Anwendung 159
  - 5.11.3 Entwurf 159
  - 5.11.4 Bemessung von Vertikaldräns aus Kunststoff 160
  - 5.11.5 Ausführung 161
- 5.12 Konsolidierung weicher, bindiger Böden durch Vorbelastung 162
  - 5.12.1 Allgemeines 162
  - 5.12.2 Anwendung 162
  - 5.12.3 Tragfähigkeit des anstehenden Bodens 163
  - 5.12.4 Schüttmaterial 163
  - 5.12.5 Bestimmung der Höhe der Vorbelastungsschüttung 163
  - 5.12.6 Mindestausdehnung der Vorbelastungsschüttung 165
  - 5.12.7 Bodenverbesserungen durch Vakuumverfahren mit Vertikaldräns 165
  - 5.12.8 Ausführung von Bodenverbesserungen durch Vakuumverfahren mit Vertikaldräns 166
  - 5.12.9 Kontrolle der Konsolidierung 167
  - 5.12.10 Sekundärsetzungen 167
- 5.13 Verbesserung der Tragfähigkeit weicher, bindiger Böden durch Vertikalelemente 167
  - 5.13.1 Allgemeines 167
  - 5.13.2 Verfahren 168
  - 5.13.3 Ausführung von pfahlartigen Tragelementen 170
- Literatur 171
  
- 6 Schutz- und Sicherungsbauwerke 173**
  - 6.1 Böschungs- und Sohlsicherung 173
    - 6.1.1 Böschungssicherungen an Binnenwasserstraßen 173
    - 6.1.2 Böschungen in Seehäfen und in Binnenhäfen mit Tide 178
    - 6.1.3 Anwendung von geotextilen Filtern bei Böschungs- und Sohlsicherungen 182
    - 6.1.4 Kolkbildung und Kolksicherung vor Ufereinfassungen 185
    - 6.1.5 Kolksicherung an Pfeilern und Dalben 193
    - 6.1.6 Einbau mineralischer Sohldichtungen unter Wasser und ihr Anschluss an Ufereinfassungen 194
  - 6.2 Hochwasserschutzwände in Seehäfen 196
    - 6.2.1 Allgemeines 196
    - 6.2.2 Maßgebende Wasserstände 196
    - 6.2.3 Wasserüberdruck und Bodenwichte 197
    - 6.2.4 Mindesteinbindetiefe der HWS-Wand 197
    - 6.2.5 Sonderbeanspruchung einer HWS-Wand 198
    - 6.2.6 Hinweise zur Berechnung von HWS-Wänden in Böschungen 198
    - 6.2.7 Konstruktive Maßnahmen 199
    - 6.2.8 Leitungen im Bereich von HWS-Wänden 200
  - 6.3 Geschüttete Molen und Wellenbrecher 201

- 6.3.1 Allgemeines 201
- 6.3.2 Standsicherheitsnachweise, Setzungen und Sackungen sowie bauliche Hinweise 201
- 6.3.3 Festlegung der Bauwerksgeometrie 201
- 6.3.4 Bemessung der Deckschicht 205
- 6.3.5 Aufbau der Wellenbrecher 207
- 6.3.6 Bauausführung und Geräteeinsatz 207
- 6.3.7 Setzungen und Sackungen 210
- 6.3.8 Abrechnung der eingebauten Mengen 210  
Literatur 210
  
- 7 Ausführung von Uferbefestigungen 213**
- 7.1 Querschnittsgestaltung 213
  - 7.1.1 Querschnittsgrundmaße von Uferbefestigungen in Seehäfen 213
  - 7.1.2 Oberkante der Uferbefestigungen in Seehäfen 215
  - 7.1.3 Querschnittsgrundmaße von Uferbefestigungen in Binnenhäfen 216
  - 7.1.4 Ausbau teilgeböschter Ufer in Binnenhäfen mit großen Wasserstandsschwankungen 220
  - 7.1.5 Gestaltung von Uferflächen in Binnenhäfen nach betrieblichen Gesichtspunkten 222
  - 7.1.6 Solltiefe und Entwurfstiefe der Hafensohle (E 36) 223
  - 7.1.7 Verstärkung von Uferbefestigungen zur Vertiefung der Hafensohle in Seehäfen 225
  - 7.1.8 Böschungen unter Ufermauerüberbauten hinter geschlossenen Spundwänden 228
  - 7.1.9 Umgestaltung von Uferbefestigungen in Binnenhäfen 230
  - 7.1.10 Uferbefestigungen in Bergsenkungsgebieten 231
- 7.2 Ausrüstung 235
  - 7.2.1 Ausrüstung von Großschiffs Liegeplätzen mit Sliphaken 235
  - 7.2.2 Anordnung, Ausbildung und Belastung von Steigeleitern 237
  - 7.2.3 Anordnung und Ausbildung von Treppen in Seehäfen 238
  - 7.2.4 Gepanzerte Stahlspundwände 240
  - 7.2.5 Ausrüstung von Uferbefestigungen in Seehäfen mit Ver- und Entsorgungsanlagen 244
  - 7.2.6 Anordnung von Pollern 250
  - 7.2.7 Gründung von Kranbahnen bei Uferbefestigungen 252
  - 7.2.8 Befestigung von Kranschienen auf Beton 254
  - 7.2.9 Anschluss der Dichtung der Bewegungsfuge in einer Stahlbetonsohle an eine tragende Umfassungsspundwand aus Stahl 261
  - 7.2.10 Anschluss einer Stahlspundwand an ein Betonbauwerk 262
  - 7.2.11 Stahlholme für Stahlspundwände bei Uferbefestigungen 263
  - 7.2.12 Stahlbetonholme für Stahlspundwände bei Uferbefestigungen 266
  - 7.2.13 Oberer Stahlkantenschutz für Stahlbetonwände und -holme bei Uferbefestigungen 272
  - 7.2.14 Schwimmende Landanlagen in Seehäfen 274
- 7.3 Entwässerung 275
  - 7.3.1 Ausbildung von Durchlaufentwässerungen in Spundwandbauwerken 275
  - 7.3.2 Ausbildung von Entwässerungen bei Uferbauwerken im Tidegebiet 276

- 7.4 Fenderausrüstung 279
  - 7.4.1 Fenderungen für Großschiffe 279
  - 7.4.2 Fenderungen in Binnenhäfen 294
- 7.5 Offshorebasishäfen 295
  - 7.5.1 Allgemeines 295
  - 7.5.2 Berechnungsgrundlagen 295
  - 7.5.3 Nautische Anforderungen 296
  - 7.5.4 Ermittlung der Beineindringung von Errichterschiffen 299
  - 7.5.5 Unterhaltung und Monitoring der Jackingflächen 302
  - 7.5.6 Logistische Anforderungen 303
- 7.6 RoRo-Anleger 309
  - 7.6.1 Allgemeines 309
  - 7.6.2 Lastannahmen für RoRo-Terminals 310
  - 7.6.3 Kinematik 312
  - 7.6.4 Klassifikation der Ship-to-Shore-Anlagen 313
  - 7.6.5 Landseitige Einrichtungen 320
- 7.7 Anlegebrücken 324
  - 7.7.1 Einleitung 324
  - 7.7.2 Entwurf von Anlegebrücken 326
  - 7.7.3 Entwurf der Anlege- und Vertäueinrichtungen (ship to shore) 327
  - 7.7.4 Bauwerkskomponenten von Anlegern 330
  - 7.7.5 Wechselwirkung Tragstruktur – Deckinstallationen 333
- Literatur 335
  
- 8 Spundwandbauwerke 337**
  - 8.1 Baustoffe und Ausführung 337
    - 8.1.1 Spundwand Baustoffe 337
    - 8.1.2 Stahlspundwände: Eigenschaften und Ausbildungen 338
    - 8.1.3 Wasserdichtheit von Stahlspundwänden 352
    - 8.1.4 Schweißen von Stahlspundwänden 354
    - 8.1.5 Einbringen von Stahlspundwänden 358
    - 8.1.6 Einbringhilfen 378
    - 8.1.7 Einbringkontrollen 384
    - 8.1.8 Sanierung von Schlossschäden an eingeramnten Stahlspundwänden 387
    - 8.1.9 Lärmschutz, schallarmes Rammen 390
    - 8.1.10 Korrosion bei Stahlspundwänden und Gegenmaßnahmen 395
    - 8.1.11 Sandschliffgefahr bei Spundwänden 401
  - 8.2 Berechnung und Bemessung der Spundwand 402
    - 8.2.1 Allgemeines 402
    - 8.2.2 Unverankerte Spundwandbauwerke 405
    - 8.2.3 Berechnung einfach verankerter, im Boden eingespannter Spundwandbauwerke 406
    - 8.2.4 Berechnung zweifach verankerter Spundwände 410
    - 8.2.5 Ansatz der Erddruckneigungswinkel und die Nachweise in vertikaler Richtung 411
    - 8.2.6 Berücksichtigung von ungünstigen Grundwasserströmungen im Erdwiderstandsbereich 422
    - 8.2.7 Tragfähigkeitsnachweis für Uferwände 422

- 8.2.8 Wahl der Einbindetiefe von Spundwänden 423
- 8.2.9 Ermittlung der Einbindetiefe für voll bzw. teilweise im Boden eingespannte Spundwände 424
- 8.2.10 Gestaffelte Einbindetiefe bei Stahlspundwänden 427
- 8.2.11 Horizontale Einwirkungen auf Stahlspundwände in Längsrichtung des Ufers 429
- 8.2.12 Berechnung von im Boden eingespannten Ankerwänden 432
- 8.2.13 Gestaffelte Ausbildung von Ankerwänden 433
- 8.2.14 Uferspundwände in nicht konsolidierten, weichen, bindigen Böden, insbesondere in Verbindung mit unverschieblichen Bauwerken 433
- 8.2.15 Ausbildung und Bemessung einfach verankerter Spundwandbauwerke in Erdbebengebieten 434
- 8.2.16 Spundwandufer an Binnenkanälen 435
- 8.2.17 Berechnung und Bemessung von Fangedämmen 436
- Literatur 447
  
- 9 Verankerungen 451**
- 9.1 Pfähle und Anker 451
  - 9.1.1 Allgemeines 451
  - 9.1.2 Verdrängungspfähle 451
  - 9.1.3 Tragfähigkeit von Verdrängungspfählen 453
  - 9.1.4 Mikropfähle 454
  - 9.1.5 Sonderpfähle 455
  - 9.1.6 Anker 455
- 9.2 Gurte und Pfahl- bzw. Ankeranschlüsse 462
  - 9.2.1 Ausbildung von Spundwandgurten aus Stahl 462
  - 9.2.2 Nachweise für Spundwandgurte aus Stahl 463
  - 9.2.3 Spundwandgurte aus Stahlbeton bei Verankerung durch Stahlrammpfähle 464
  - 9.2.4 Hilfsverankerung am Kopf von Stahlspundwandbauwerken 467
  - 9.2.5 Spundwandverankerungen in nicht konsolidierten weichen, bindigen Böden 468
  - 9.2.6 Ausbildung und Berechnung vorspringender Kaimauerecken mit Rundstahlverankerung 471
  - 9.2.7 Ausbildung und Berechnung vorspringender Kaimauerecken mit Schrägpfählen 473
  - 9.2.8 Vorspannen von Ankern aus hochfesten Stählen bei Uferbefestigungen 475
  - 9.2.9 Gelenkiger Anschluss gerammter Stahlpfähle an Stahlspundwandbauwerke 477
- 9.3 Nachweis der Standsicherheit von Verankerungen in der tiefen Gleitfuge 487
  - 9.3.1 Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge bei Verankerungen mit Ankerwänden 487
  - 9.3.2 Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge bei nicht konsolidierten, wassergesättigten bindigen Böden 489
  - 9.3.3 Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge bei wechselnden Bodenschichten 489
  - 9.3.4 Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge bei Einspannung der Uferwand 490
  - 9.3.5 Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge bei eingespannter Ankerwand 490

- 9.3.6 Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge bei Verankerungen mit Ankerplatten 490
- 9.3.7 Nachweis der Sicherheit gegen Aufbruch des Verankerungsbodens 490
- 9.3.8 Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge bei Uferwänden, die mit Pfählen oder Verpressankern in einer Ankerlage verankert sind 491
- 9.3.9 Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge bei Uferwänden, die in mehreren Lagen verankert sind 493
- 9.3.10 Sicherheit gegen Geländebruch 494
  - Literatur 494
  
- 10 Uferwände, Ufermauern und Überbauten aus Beton 499**
  - 10.1 Allgemeines 499
  - 10.2 Baustoffe 500
    - 10.2.1 Beton 500
    - 10.2.2 Betonstahl 502
  - 10.3 Konstruktion und Bauausführung 502
    - 10.3.1 Arbeitsfugen 502
    - 10.3.2 Raumfugen 502
    - 10.3.3 Schalungen 503
    - 10.3.4 Fugenlose Bauweise 503
    - 10.3.5 Rissbreitenbegrenzung 503
  - 10.4 Bauweisen 504
    - 10.4.1 Betonwände 504
    - 10.4.2 Stützmauern 506
    - 10.4.3 Blockbauweise 506
    - 10.4.4 Schwimmkästen 509
    - 10.4.5 Senkkästen 510
    - Literatur 514
  
- 11 Pfahlrostkonstruktionen 517**
  - 11.1 Allgemeines 517
  - 11.2 Ausbildung und Bemessung ebener Pfahlrostkonstruktionen 517
    - 11.2.1 Allgemeines 517
    - 11.2.2 Belastung durch Erddruck 518
    - 11.2.3 Belastung durch Wasserüberdruck 519
    - 11.2.4 Lastabtrag Pfähle 519
  - 11.3 Ausbildung und Bemessung räumlicher Pfahlrostkonstruktionen 521
    - 11.3.1 Frei stehende Pfahlroste 521
    - 11.3.2 Sonderbauwerke in räumlichen Pfahlrostkonstruktionen 522
    - 11.3.3 Statisches System und Berechnung 523
    - 11.3.4 Konstruktive Hinweise 523
  - 11.4 Ausbildung und Bemessung von Pfahlrostkonstruktionen in Erdbebengebieten 524
    - 11.4.1 Allgemeines 524
    - 11.4.2 Erddruck, Erdwiderstand, Wasserüberdruck, Verkehrslasten 525
    - 11.4.3 Aufnahme der waagrecht gerichteten Massenkkräfte des Überbaus 525
    - Literatur 525

<b>12</b>	<b>Dalben</b>	527
12.1	Entwurf und Ausführung	527
12.1.1	Zweck und Ausführungsformen von Dalben	527
12.1.2	Anordnung der Dalben	527
12.1.3	Ausrüstung der Dalben	528
12.1.4	Hinweise zur Materialwahl	529
12.2	Bemessung	530
12.2.1	Systemsteifigkeit	530
12.2.2	Tragverhalten	530
12.2.3	Einwirkungen	531
12.2.4	Sicherheitskonzept	533
12.2.5	Boden-Bauwerk-Interaktion und daraus resultierende Bemessungsgrößen	533
12.2.6	Erforderliches Arbeitsvermögen von Anlegedalben	538
12.2.7	Weitere Berechnungsgrundlagen	539
	Literatur	540
<b>13</b>	<b>Betrieb, Unterhaltung und Instandsetzung von Ufereinfassungen</b>	543
13.1	Betrieb von Ufereinfassungen	543
13.1.1	Allgemeines	543
13.1.2	Nutzung von BIM	543
13.2	Bauwerksinspektion	544
13.2.1	Dokumentation	545
13.2.2	Durchführung	546
13.2.3	Inspektionsintervalle	547
13.2.4	Messtechnisch gestütztes Bauwerksmonitoring	548
13.3	Tragfähigkeitsbewertungen bestehender Ufereinfassungen	549
13.4	Instandsetzung von Ufereinfassungen aus Beton	551
13.5	Ertüchtigung und Rückbau von bestehenden Ufereinfassungen	551
13.5.1	Ertüchtigungsmaßnahmen	552
13.5.2	Rückbau im Zusammenhang mit Ersatzbaumaßnahmen	553
	Literatur	553
	<b>Anhang A Zeichenerklärung</b>	555
A.1	Kurzzeichen für Rechengrößen	556
A.1.1	Lateinische Kleinbuchstaben	556
A.1.2	Lateinische Großbuchstaben	557
A.1.3	Griechische Buchstaben	559
A.2	Indizes	560
A.3	Abkürzungen	561
A.4	Wasserstände und Wellenhöhen	562
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	563
	<b>Inserentenverzeichnis</b>	581

## 2

# Schiffsabmessungen

## 2.1 Seeschiffe

Bei der Berechnung und Bemessung von Ufereinfassungen und von Fenderungen und Dalben kann mit den in den Tab. 2.1–2.8 beschriebenen beispielhaften mittleren Schiffsabmessungen gerechnet werden. Zu berücksichtigen ist dabei, dass es sich um mittlere Werte handelt, deren Größe um bis zu 10 % über- oder unterschritten werden kann. Die Angaben von Tankern, Massengutfrachtern und Containerschiffen wurden aus Port of Rotterdam „table of design ships“ sowie der Datenbank Ships-Register<sup>1)</sup> übernommen. Für detailliertere Informationen wird eine eigene Recherche (Internet, Schiffsregister etc.) empfohlen.

Definitionen der gebräuchlichen Angaben zu Schiffsgrößen:

- Die Schiffsvermessung erfolgt auf der Grundlage der Bruttoreaumzahl (BRZ), einer dimensionslosen Größe (engl. Gross Tonnage, GT). Diese ist aus dem Gesamtvolumen des Schiffes abgeleitet. Die früher übliche Messeinheit Bruttoregistertonne (BRT; eine Registertonne entsprach 100 cubic feet, d. h. 2,83 m<sup>3</sup>) ist entsprechend einer internationalen Vereinbarung seit dem Jahr 1994 nicht mehr zugelassen.
- Die Tragfähigkeit (deadweight tonnage, dwt) wird in metrischen Tonnen angegeben und gibt die maximale Ladekapazität eines voll ausgerüsteten, betriebsfertigen Schiffes an. Es besteht kein mathematischer Zusammenhang zwischen der Tragfähigkeit und der Schiffsvermessung.
- Die Wasserverdrängung (engl. displacement) gibt das tatsächliche Gewicht des Schiffes einschließlich der maximalen Zuladung in metrischen Tonnen an.
- Es besteht kein mathematischer Zusammenhang zwischen der Wasserverdrängung und der Tragfähigkeit und/oder der Schiffsvermessung.
- Containerschiffe werden in der Regel nach ihrer Stellplatzkapazität beurteilt, die in Stück TEU (twenty feet equivalent unit) angegeben wird. Ein TEU ist eine international standardisierte Einheit zur Zählung von ISO-Containern in den Abmessungen von Länge: 6,058 m, Breite: 2,438 m, Höhe: 2,591 m.

### 2.1.1 Fahrgast- und Kreuzfahrtschiffe

Bei den Fahrgast-/Kreuzfahrtschiffen geht der Trend in den vergangenen Jahren eindeutig zu immer größeren Einheiten. Für den Entwurf eines neuen Terminals ist daher

1) <http://www.ships-register.com>.

ein entsprechend großes Bemessungsschiff zu berücksichtigen. Hierbei ist zu beachten, dass die maximale Schiffsbreite teilweise oberhalb der Wasserlinie auftritt. So sind z. B. die Schiffe der Oasis-Klasse auf Höhe der Wasserlinie 47 m, darüber jedoch 60 m breit.

**Tab. 2.1** Fahrgast- und Kreuzfahrtschiffe.

Schiffs- vermessung	Tragfähig- keit	Wasser- verdrängung G	Länge über alles	Länge zwischen den Loten	Max. Breite	Max. Tiefgang
[BRZ/GT]	[dwt]	[to]	[m]	[m]	[m]	[m]
225 000	–	100 000	362	330	60,5	9,3
149 000	–	76 000	345	301	41,0	10,3
128 000	–	k. A.	305	270	37,2	8,2
110 000	–	k. A.	290	248	35,5	8,3
90 000	–	k. A.	294	263	32,2	8,3
70 000	–	37 600	260	220	33,1	7,6
50 000	–	27 900	231	197	30,5	7,6
30 000	–	17 700	194	166	26,8	7,6
20 000	–	12 300	169	146	24,2	7,6

### 2.1.2 Massengutfrachter – Bulk Carrier

Der Trend zu immer größeren Einheiten bei den Massengutfrachtern/Bulk Carriern scheint mit dem seit 2010 laufenden Bauprogramm der 35 weltgrößten Einheiten der Valemax-Klasse (388 000–400 000 dwt) abgeschlossen zu sein.

**Tab. 2.2** Massengutfrachter – Bulk Carrier.

Schiffs- vermes- sung	Tragfähig- keit	Wasser- verdrän- gung G	Länge über alles	Länge zwischen den Lo- ten	Breite	Max. Tiefgang	Generation/ Klasse
[BRZ/GT]	[dwt]	[to]	[m]	[m]	[m]	[m]	
–	400 000	468 000	362	350	65,0	23,0	Chinamax ULBC <sup>a)</sup>
–	325 000	380 000	340	k. A.	62,0	21,0	VLBC <sup>b)</sup>
	175 000	205 000	290	k. A.	45,0	17,0	Capesize
	75 000	96 000	229	k. A.	32,3	13,5	Panamax
–	55 000	64 000	200	k. A.	32,3	11,5	Handymax
–	30 000	35 100	170	k. A.	27,0	9,4	Handysize
–	8 000	k. A.	107	k. A.	18,2	6,8	Coaster

a) Ultra Large Bulk Carrier.

b) Very Large Bulk Carrier.

über die Erddruckbezugslinie hinausragenden Wand mit einer gleichzeitig unter dem fiktiven Winkel  $\varphi'$  geneigten fiktiven Böschung ermittelt werden (Abb. 3.12).

### 3.5.5 Ermittlung der Erddruckabschirmung auf eine Wand unter einer Entlastungsplatte bei mittleren Geländeauflasten

Durch eine Entlastungsplatte kann, abhängig vor allem von der Lage und der Breite der Platte sowie von der Scherfestigkeit und Zusammendrückbarkeit des Bodens, hinter der Wand und unter der Sohle des Bauwerks der Erddruck auf eine Wand mehr oder weniger abgeschirmt werden. Die für die Schnittkraftermittlung maßgebende Erddruckverteilung wird dadurch günstig beeinflusst. Bei einheitlichem nichtbindigen Boden und mittleren Geländeauflasten (üblicherweise 20–40 kN/m<sup>2</sup> als gleichmäßig verteilte Last) kann die Erddruckabschirmung nach Brennecke und Lohmeyer, 1930 (Abb. 3.13), ermittelt werden. Wie durch Culmann-Untersuchungen nachgewiesen werden kann, trifft unter den obigen Voraussetzungen der Lohmeyer-Ansatz gut zu.

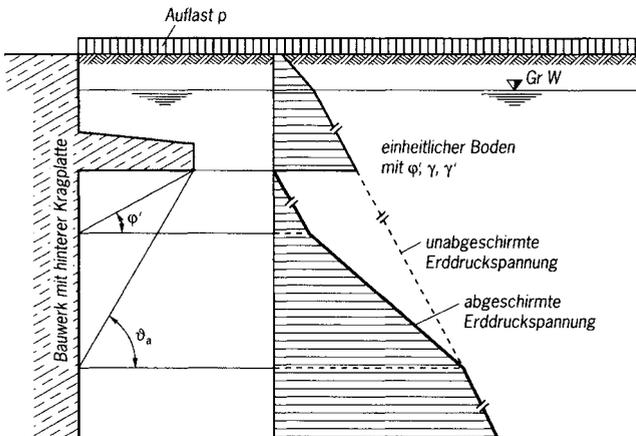
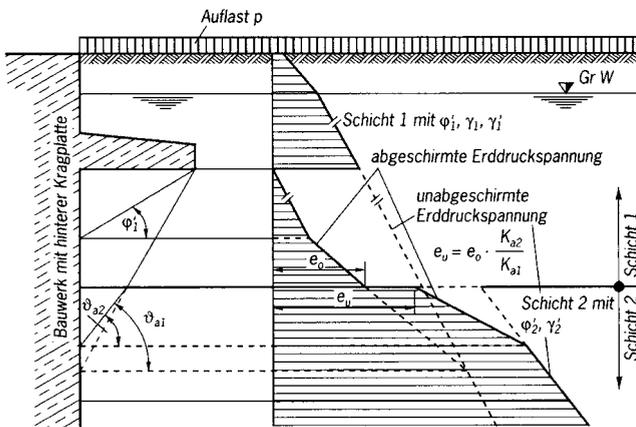


Abb. 3.13 Lösung nach Lohmeyer bei einheitlichem Boden.



im Beispiel sind:  $\varphi_2 < \varphi_1$ ;  $K_{a2} > K_{a1}$ ;  $\vartheta_{a2} < \vartheta_{a1}$ ;  $\gamma_2 < \gamma_1$

Abb. 3.14 Lösung nach Lohmeyer mit Erweiterung für geschichteten Boden (Lösungsmöglichkeit 1).



## 7.5 Offshorebasishäfen

### 7.5.1 Allgemeines

Für die Installation von Windparks ist es erforderlich, küstennahe Umschlagsmöglichkeiten für die einzelnen Komponenten der Windenergieanlagen zu errichten. Diese Offshorebasishäfen bestehen wasserseitig aus Anlegemöglichkeiten für unterschiedliche Schiffskategorien wie Versorgungsschiffe, Schiffe für den Materialtransport der einzelnen Komponenten, insbesondere Jack-up-Bargen und Hubschiffe sowie weiterer Spezialschiffe. Für die Ausbildung der wasserseitigen Uferbefestigung ergeben sich zunächst keine wesentlich anderen Randbedingungen als für die Bemessung und Ausbildung von klassischen Hafenanlagen. Lediglich für die erforderlichen Aufjackvorgänge von Hubschiffen und Jack-up-Bargen ist es erforderlich, das Seebett vor der Kaje so auszubilden, dass der Jack-up-Vorgang problemlos und ohne Auswirkungen auf die Uferbefestigung ausgeführt werden kann. Im Hinterlandbereich sind für den Umschlag von Turmteilen, Gondeln, Rotorblättern und Gründungskörpern entsprechende Vorrichtungen vorzusehen. Diese einzelnen Bauteile sind durch hohe Lasten, die durch geeignete Maßnahmen sicher in den Untergrund abzuleiten sind, gekennzeichnet. Die Infrastruktur ist generell in Abhängigkeit von den Randbedingungen des Umschlaghafens individuell zu planen. Das Design dieser Umschlagsanlagen beeinflusst in der Regel die Bemessung der Kaianlage nicht und wird deshalb im vorliegenden Werk nicht behandelt. Weitere Anforderungen an die Suprastruktur, wie die Versorgung mit Medien, äußere Anbindung, Einzäunung, Straßen, Entwässerung und Beleuchtung werden ebenfalls nicht in den Empfehlungen des Arbeitskreises Uferbefestigung behandelt. Hier wird auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen, wobei die entsprechenden Randbedingungen in eine individuelle Planung einzubeziehen sind.

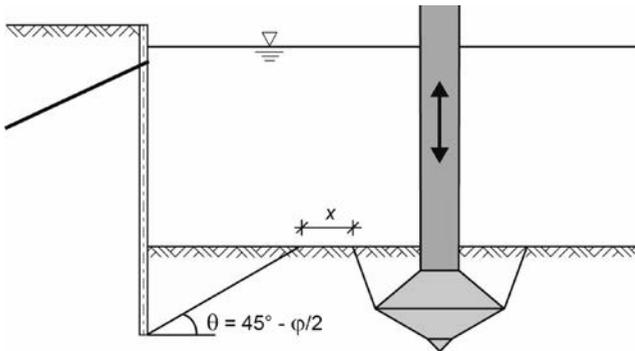
### 7.5.2 Berechnungsgrundlagen

Die wesentlichen Randbedingungen für die Uferbefestigungen von Offshorebasishäfen unterscheiden sich nicht von Uferbefestigungen für andere Nutzungsformen. Aus diesem Grunde wird an dieser Stelle für die Bemessungsgrundlagen und die Bemessung selbst auf die einzelnen Kapitel der EAU verwiesen. Diese sind

- Kapitel 2 für die Festlegung grundlegender Schiffsabmessungen,
- Kapitel 3 für die Ermittlung von Erddruck und Erdwiderstand,
- Kapitel 3 für die Nachweise gegen den hydraulischen Grundbruch und Geländebruch,
- Kapitel 4 für die Belastungen von Uferbefestigungen,
- Kapitel 5 für Erdarbeiten und Baggerungen,
- Kapitel 6 für die Planung von Schutz- und Sicherungsbauwerken,
- Kapitel 8 für die Bemessung der Uferbefestigung selbst.

In Ergänzung zu den vorgenannten Berechnungsgrundlagen gilt es für den Nachweis von Hubvorgängen die Beineindringung vor der Uferbefestigung zu bemessen. Die grundlegenden Randbedingungen hierzu werden nachfolgend beschrieben.

Für die Bemessung von Uferbefestigungen von Offshorebasishäfen bzw. den Nachweis von vorhandenen Anlagen ist es erforderlich, die Belastungen hinter der Uferbefestigung realitätsnah zu erfassen. Neben den vertikalen Belastungen sind auch Horizontallasten aus Bewegungsvorgängen der Transportgeräte einzubeziehen. Da die logistischen



**Abb. 7.74** Vermeiden einer Überlappung des Eindring- oder Herausziehschermechanismus des Hubbeins mit dem Erdwiderstandsbruchkörper.

Randbedingungen sehr individuell sind und sich auch zügig fortentwickeln, sind die Beanspruchungen mit dem Betreiber festzulegen.

Vor der Ufereinfassung müssen die Beanspruchungen aus den Hubvorgängen ermittelt werden. Hierzu werden nachfolgend Hinweise zur Abschätzung der Beineindringung gegeben. Hieraus leiten sich dann Maßnahmen und Auswirkungen ab, wobei folgende Szenarien möglich sind:

- a) Aus dem Hubvorgang und der Beineindringung ergeben sich keine Auswirkungen auf die Ufereinfassung, da die Standsicherheit der Wand aufgrund des Abstands zwischen der Ufereinfassung und des Abdrucks der Beineindringung (Footprint) nicht gefährdet ist (siehe Abb. 7.74).
- b) Die Beineindringung hinterlässt einen Abdruck, der einen Nachweis der Ufereinfassung erfordert.

Bei b) sind geeignete Maßnahmen zur Verringerung der Beineindringung durch eine Bodenverbesserung empfehlenswert. Diese ist im Zusammenspiel mit einem Baugrundgutachter zu dimensionieren (ergänzende Hinweise hierzu sind Abschn. 5.9 zu entnehmen). Unabhängig hiervon sind Vorgänge zu untersuchen, die sich aus dem mehrfachen Hubvorgang ergeben. Insbesondere die Interaktion aus nacheinander erfolgenden Hubvorgängen an gleichen Lokationen ist zu untersuchen, wobei derartige Auswirkungen durch geeignete Verfüllungen der Abdrücke vermieden werden. Numerische Untersuchungen zum Eindringen von Spudcans werden in Qiu et al. (2013, 2014) vorgestellt.

Zusätzlich zu den genannten Einflüssen sind die Einflüsse aus einer Kolkbildung bei längeren Standzeiten in Sandböden zu betrachten. Weiterhin sind gesonderte Untersuchungen notwendig, wenn das Errichterschiff ein Spülsystem einsetzt, um das Herausziehen der Beine aus dem Boden zu erleichtern. Dies sollte im Basishafen im Allgemeinen vermieden werden, da hierdurch eine weiträumige und tiefgehende Störung des Baugrundes vor der Ufereinfassung hervorgerufen wird.

### 7.5.3 Nautische Anforderungen

Die nautischen Anforderungen an einen Offshorebasishafen lassen sich aus den offshoreaffinen Schiffstypen herleiten. Hierbei werden die nautischen Anforderungen nicht nur durch Transport- und Errichterschiffe bestimmt, sondern auch durch Service- und Feederschiffe.

### 7.5.3.1 Bemessungsschiffe

Für die Bemessung der Ufereinfassung als auch für die Wahl der Ausrüstungselemente unterscheiden sich die Bemessungsschiffe nicht grundlegend von anderen Schiffen. Bei den klassischen Errichterschiffen ist davon auszugehen, dass diese Schiffe sich ausschließlich in einer Entfernung zwischen 10–25 m von der Ufereinfassung aufrichten werden. Ein Vertäueinsatz oder der Gebrauch einer Fenderanlage für die Errichterschiffe ist standardmäßig nicht anzusetzen.

#### *Errichterschiffe/ Jack-up-Installationsschiffe*

Die gegenwärtigen Errichterschiffe (Abb. 7.75) werden derzeit als Installationsschiffe im Windpark eingesetzt und holen sich die zu installierenden Elemente in den Basishäfen ab. Hierzu heben sich die Schiffe im Basishafen mittels ihrer Hubbeine aus dem Wasser, um so ihre besonders leistungsfähigen Bordkräne einsetzen zu können. Der Bordkran des Errichterschiffes Innovation hat z. B. bei einer Auslage von 32,5 m eine Tragfähigkeit von 1500 t (siehe Abschn. 2.3).

Bei den Hubbeinen (spuds) handelt es sich, abhängig vom Schiff, um zylindrische oder gitterförmige Stahlkonstruktionen. Am unteren Ende der Beine befinden sich bei den meisten Schiffen sogenannte Spudcans. Unter Spudcans versteht man eine Vergrößerung der Aufstandsfläche, die bewirkt, dass die Hubbeine beim Vorgang des Aufrichtens nicht zu sehr in den Boden eindringen.

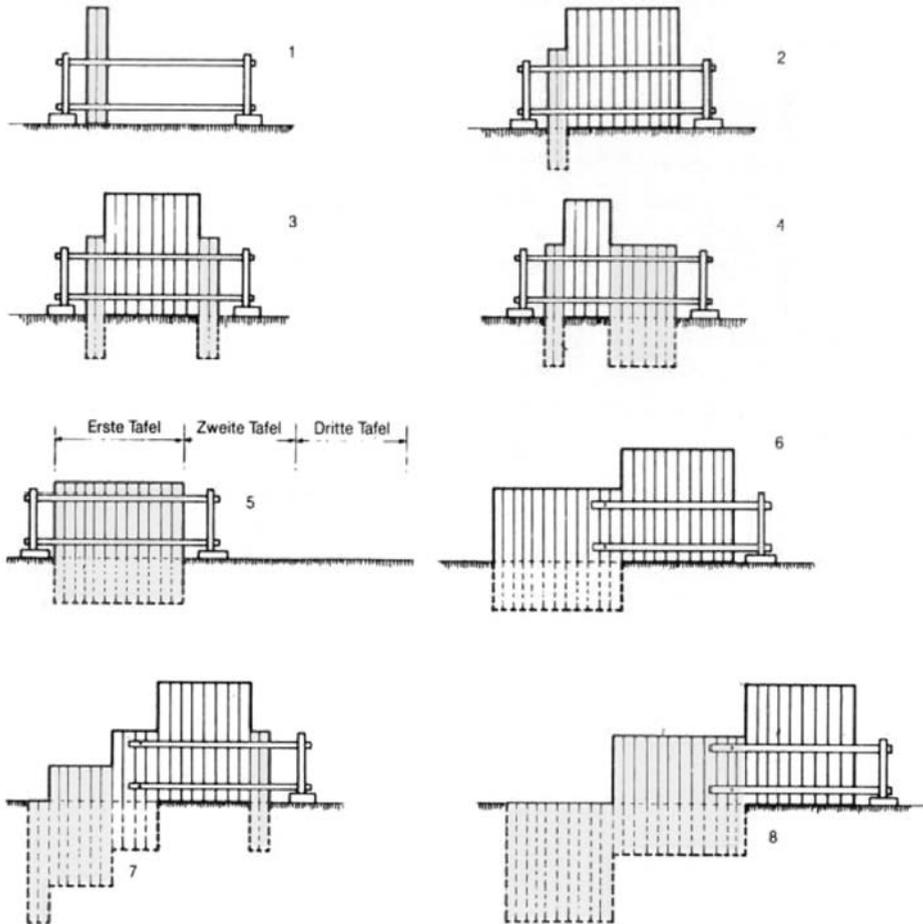
In Abhängigkeit von der Maximallast (preloading), die ein Errichterschiff pro Hubbein aufzubringen hat, sind die Flächen der Spudcans sehr unterschiedlich. In der Tab. 7.4 sind für einige bekannte Errichterschiffe die maximalen Preload-Lasten, die Spudcan-Fläche und die resultierenden Flächenlasten ausgewiesen.

#### *Offshorekranschiffe*

Die beiden derzeit größten Offshorekranschiffe, die im Rahmen der Errichtung von Offshorewindparks eingesetzt werden, sind die Stanislav Yudin und die Oleg Strashnow. Die Oleg Strashnow ist mit einem Offshorekran ausgerüstet, der bei einer Auslage von 32 m



**Abb. 7.75** Jack-up-Schiff beim Heben eines Monopiles.



**Abb. 8.9** Staffelweises Einbringen von Spundbohlen. 1 – die erste Doppelbohle vertikal und horizontal ausrichten; 2 – die erste Bohle anrammen, die restlichen Bohlen aufstellen und ausrichten; 3 – Anrammen der letzten Bohle; 4 – Einrammen der restlichen Bohlen, beginnend von der letzten zurück zur ersten; 5 – erste Tafel teilweise eingerammt; 6 – zweite Tafel ausgerichtet; aus der letzten Doppelbohle der ersten Tafel wird die erste Bohle der zweiten Tafel; die Führungsträger werden an der letzten eingerammten Bohle befestigt; 7 – erste Tafel stufenweise auf Endtiefe bringen, die letzte Bohle der zweiten Tafel anrammen; 8 – erste Tafel vollständig, zweite Tafel teilweise eingerammt, dritte Tafel ausgerichtet; die letzte Bohle der zweiten Tafel wird zur ersten der dritten Tafel.

im Boden vermieden. Sowohl bei U- wie auch bei Z-Bohlen kann das Anschrägen der Bohlenfüße zu Schlossschäden führen und ist deshalb zu unterlassen.

Müssen die Achsmaße bestimmter Wandstrecken möglichst genau eingehalten werden, ist die Breitentoleranz der Bohlen zu beachten. Erforderlichenfalls sind Passbohlen (Abb. 8.11b) einzuschalten.

**8.1.5.2.2.1 Einrammen von Stahlspundwänden in Fels** Wenn Fels eine dickere verwitterte Übergangszone mit einer nach der Tiefe zunehmenden Festigkeit aufweist, oder wenn weiches Gestein ansteht, lassen sich Stahlspundbohlen erfahrungsgemäß so tief

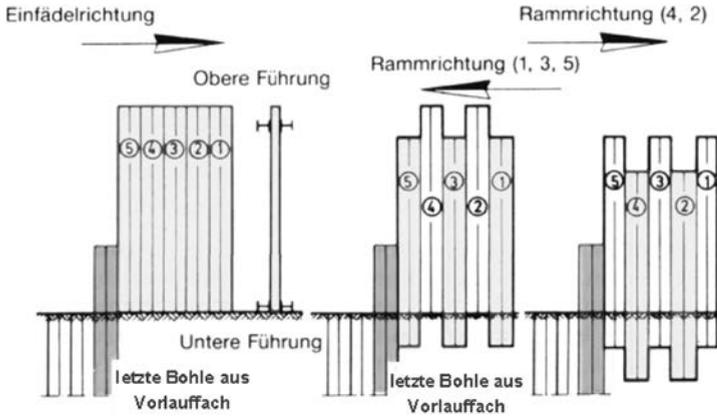


Abb. 8.10 Fachweises Einbringen von Spundbohlen.

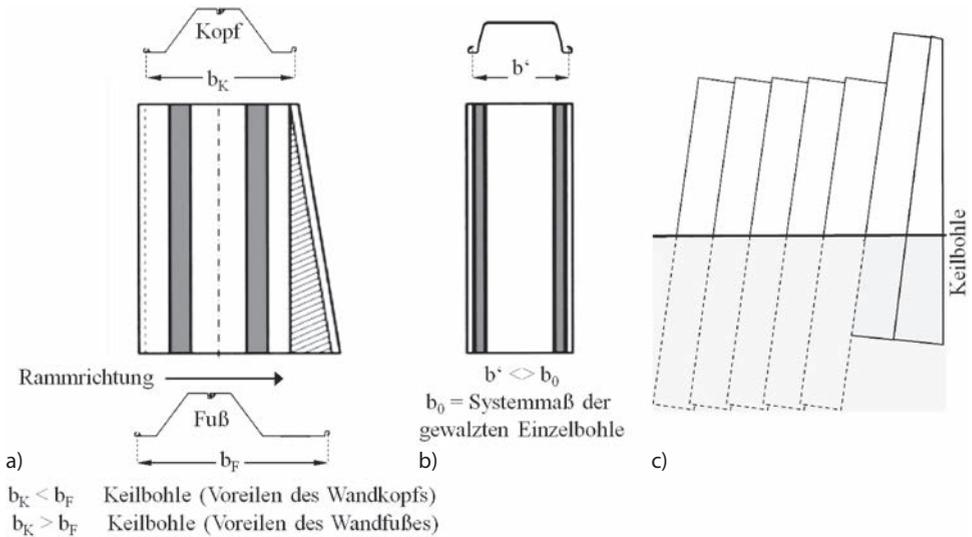


Abb. 8.11 Prinzipskizzen für Keil- und Passbohlen: (a) Keilbohle, (b) Passbohle, (c) Voreilen des Wandkopfs.

in den Fels einrammen, dass eine Fußstützung erzielt wird, die mindestens für freie Auflagerung ausreichend ist.

Um das Einrammen der Spundbohlen in den Fels zu ermöglichen, müssen diese je nach Profilart und Gestein am Wandfuß und ggf. auch am Kopf entsprechend verstärkt werden. Mit Rücksicht auf die erforderliche große Rammenergie empfiehlt es sich, für den Spundwandwerkstoff die Stahlgüte S 355 GP (Abschn. 8.1.2.1) zu wählen. Es ist sehr zweckmäßig, mit schweren Rammhämmern und mit entsprechend kleiner Fallhöhe zu arbeiten. Eine ähnliche Wirkung lässt sich bei Einsatz von Hydraulikhämmern erzielen, deren Schlagenergie in Anpassung an den jeweiligen Rammenergiebedarf kontrolliert regelbar ist (siehe Abschn. 8.1.5.2.1).

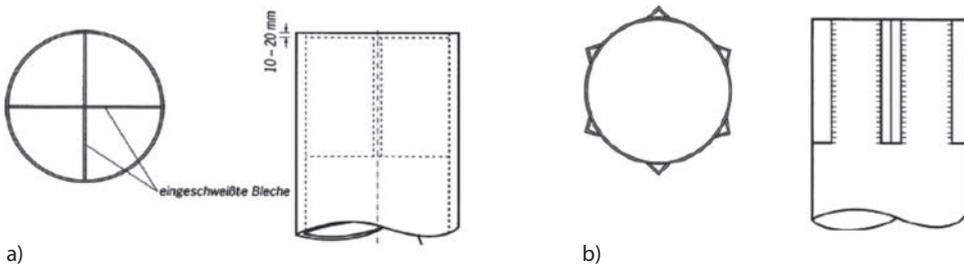
Steht ein nicht verwitterter, harter Fels bis zur Oberfläche an, sind Proberammungen und Felsuntersuchungen unerlässlich. Gegebenenfalls müssen für die Fußsicherung und die Bohlenführung besondere Maßnahmen getroffen werden wie z. B. durch Verwendung von Felsdübel gemäß Abschn. 8.12 der DIN EN 12063:1999.

#### 8.1.5.2.3 Einrammen der Tragbohlen und Füllbohlen kombinierter Stahlspundwände

Die Tragbohlen kombinierter Stahlspundwände, Kasten-, Träger- oder Rohrpfähle (Abschn. 8.1.2.8), werden meist eingerammt. Füllbohlen können gerammt und/oder einviбриert (Abschn. 8.1.5.3) werden. Damit die Füllbohlen eingebracht werden können, ohne dass die Schlossverbindungen überbeansprucht werden, müssen die Tragbohlen innerhalb vereinbarter Toleranzen im planmäßigen Abstand und ohne Verdrehung parallel zueinander stehen.

Wenn Tragrohre beim Einbringen auf Hindernisse stoßen, können diese durch Ausbaggern im Inneren des Rohres beseitigt werden. Voraussetzung ist allerdings, dass der Innendurchmesser der Rohrtragbohlen ausreichend groß ist, um geeignetes Baggergerät einsetzen zu können ( $> 1200$  mm) und im Rohrrinneren keine Konstruktionselemente, wie z. B. innen liegende Schlosskammern, vorstehen (Abschn. 8.1.5).

Beim Einrammen von Stahlrohren besteht die Gefahr, dass die Pfahlköpfe ausbeulen, besonders bei Rohren mit verhältnismäßig geringen Wanddicken. Dies kann bedeuten, dass die Rohre nicht auf die geplante Tiefe gebracht werden können. Um in solchen Fällen ein Ausbeulen zu verhindern, muss der Pfahlkopf ausgesteift werden. Es haben sich verschiedene Maßnahmen bewährt (siehe Abb. 8.12).



**Abb. 8.12** Aussteifung der Rohrköpfe (a) mit eingeschweißten Blechen und (b) mit außen angeschweißten Winkelprofilen.

Kombinierte Stahlspundwände werden oft zum Bauen von Kaimauern in Seehäfen verwandt. Wegen der bei solchen Konstruktionen meist erheblichen Längen der Traglelemente von kombinierten Stahlspundwänden sind diese mit größtmöglicher Sorgfalt zu rammen. Nur dann kann damit gerechnet werden, dass die Tragbohlen ihre Sollstellung haben und die Füllbohlen mit unversehrten Schlossverbindungen eingebracht werden können. Dies setzt aber auch eine Flexibilität der Füllbohlen beim Einbringen voraus

**Anforderungen an die Wandelemente** Zum Erhalt dieser benötigten Flexibilität sollten die Mittelschlösser der Füllbohlen nicht auf ihrer gesamten Länge starr verbunden sein, sodass sich hier noch eine Schlossdrehung einstellen kann. Deshalb sollten sie lediglich am Kopf mit einer Transport- und Anhebesicherung auf wenige Dezimeter verpresst oder verschweißt werden.

$E_{1,k}$  charakteristischer aktiver Erddruck mit Nutzlast auf die Ankerwand DB,  
 $P_k$  charakteristische Ankerkraft.

Bei der charakteristischen Ankerkraft muss zwischen dem Anteil  $P_{G,k}$  aus ständigen Einwirkungen und dem Anteil  $P_{Q,k}$  aus veränderlichen Einwirkungen unterschieden werden.

Der Nachweis ist sowohl für ausschließlich ständige Lasten als auch für ständige und veränderliche Lasten zu führen. Im zweiten Fall sind die Anteile aus den veränderlichen Lasten in ungünstigster Laststellung zu berücksichtigen. Die sich aus diesen Anteilen ergebende Kraft  $P_{Q,k}$  ist getrennt auszuweisen.

Die Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge ist gegeben, wenn gilt:

$$P_{G,k} \cdot \gamma_G \leq \frac{R_{A,cal}}{\gamma_{Ep}}$$

wobei  $R_{A,cal}$  aus dem Krafteck entsprechend Abb. 9.22 für ausschließlich ständige Lasten ermittelt wird und

$$P_{G,k} \cdot \gamma_G + P_{Q,k} \cdot \gamma_Q \leq \frac{R_{A,cal}}{\gamma_{Ep}}$$

wobei  $R_{A,cal}$  aus dem Krafteck entsprechend Abb. 9.22 für ständige und veränderliche Lasten ermittelt wird.

Für den Nachweis der Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge werden folgende Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN 1054 angesetzt:

$\gamma_G$  Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen,  
 $\gamma_Q$  Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen,  
 $\gamma_{Ep}$  Teilsicherheitsbeiwert für Erdwiderstand.

Dem Nachweis der Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge liegt die Vorstellung zugrunde, dass durch die Einleitung der Ankerkraft in den Boden ein Bruchkörper hinter der Uferwand entsteht, der durch die Uferwand, die Ankerwand und die tiefe Gleitfuge begrenzt ist. Dabei wird der maximal mögliche Scherwiderstand in der tiefen Gleitfuge ausgenutzt, während der Grenzwert für die Fußauflagerkraft nicht erreicht wird.  $R_{A,cal}$  ist die charakteristische Ankerkraft, die von dem Gleitkörper FDBA bei voller Ausnutzung der Scherfestigkeit des Bodens höchstens aufgenommen werden kann. Die Definition der Ausnutzung der Ankerkraft steht stellvertretend für die Ausnutzung der Scherfestigkeit des Bodens.

Auch beim Nachweis der Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge wird das Gleichgewicht der angreifenden Momente nicht betrachtet, weil nur die Resultierenden der über die Begrenzungen des Gleitkörpers eingeleiteten Einwirkungen in den Nachweis eingehen. Die tiefe Gleitfuge wird durch die Verbindungsgerade DF mit ausreichender Genauigkeit als maßgebende Gleitfuge ersetzt.

Will man im Falle eines durchströmten Gleitkörpers (zur Spundwand abfallender Grundwasserspiegel) die Strömungskraft im Gleitkörper berücksichtigen, müssen die Wasserdrücke auf die Uferwand, auf die Ankerwand und die tiefe Gleitfuge aus einem Strömungsnetz nach Abschn. 3.4 ermittelt und zu Resultierenden in der jeweiligen Begrenzungsfläche des Gleitkörpers zusammengefasst werden.

### 9.3.2 Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge bei nicht konsolidierten, wassergesättigten bindigen Böden

Der Nachweis der Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge wird für Uferwände und ihre Verankerungen in nicht konsolidierten, bindigen Böden wie in Abschn. 9.3.1 geführt. Der Erddruck ist für den nicht konsolidierten, wassergesättigten Fall nach Abschn. 3.5.7 zu ermitteln. In der tiefen Gleitfuge wirkt die charakteristische Kohäsionskraft  $C_{u,k}$ . Der Reibungswinkel ist bei nicht konsolidierten, wassergesättigten, erstbelasteten, bindigen Böden mit  $\varphi_u = 0$  anzusetzen.

### 9.3.3 Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge bei wechselnden Bodenschichten

Der Nachweis der Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge wird bei wechselnden Bodenschichten gemäß Abschn. 9.3.1 geführt. Der Gleitkörper entsprechend Abb. 9.23 wird durch gedachte lotrechte Trennfugen durch die Schnittpunkte der tiefen Gleitfuge mit den Schichtgrenzen zerlegt. Dadurch wird der Gleitkörper FDDBA in so viele Teilkörper aufgeteilt, wie Schichten von der tiefen Gleitfuge geschnitten werden. Nun wird das Kräftegleichgewicht nacheinander für alle Teilkörper gebildet. Führen Teilstrecken der tiefen Gleitfuge durch bindige Böden, wird in diesen Teilstrecken eine Kohäsionskraft angesetzt (im Kräfteck in Abb. 9.23 ist Kohäsion nicht berücksichtigt).

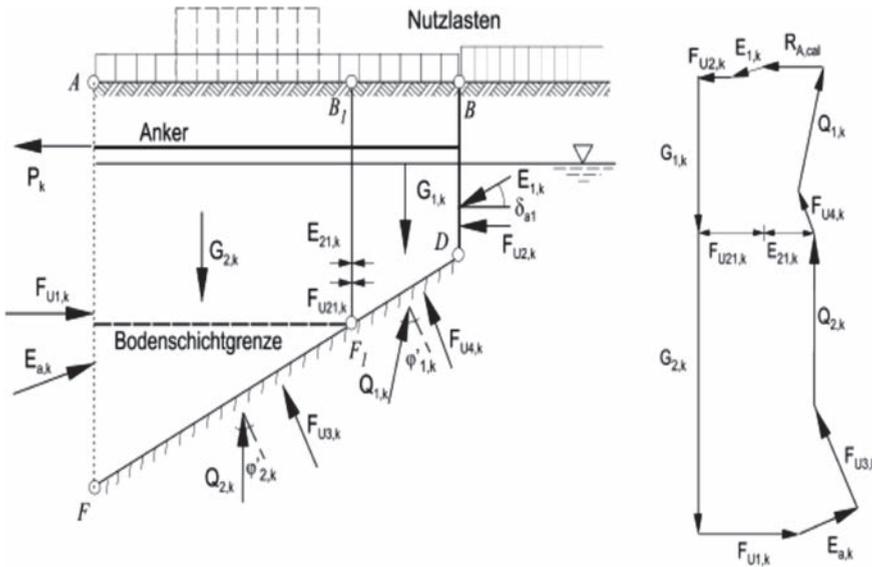


Abb. 9.23 Nachweis der Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge bei geschichtetem Boden.

Die Erddruckkräfte in den vertikalen Schnitten zwischen den Teilkörpern werden parallel zur Oberfläche angesetzt.

An den Gleitkörpern in Abb. 9.23 wirken folgende charakteristische Kräfte:

- $G_{1,k}$  totale Gewichtskraft des Gleitkörpers  $F_1DBB_1$ , ggf. zuzüglich Nutzlast,
- $G_{2,k}$  totale Gewichtskraft des Gleitkörpers  $FF_1B_1A$ , ggf. zuzüglich Nutzlast,
- $E_{a,k}$  aktiver Erddruck (über alle Bodenschichten),
- $P_k$  Ankerkraft,

- $F_{U1,k}$  Wasserdruckkraft zwischen Boden und Stützwand AF,  
 $F_{U2,k}$  Wasserdruckkraft auf die Ankerwand DB,  
 $F_{U3,k}$  Wasserdruckkraft auf die tiefe Gleitfuge im Abschnitt FF<sub>1</sub>,  
 $F_{U4,k}$  Wasserdruckkraft auf die tiefe Gleitfuge im Abschnitt F<sub>1</sub>D,  
 $F_{U21,k}$  Wasserdruckkraft auf die lotrechte Trennfuge F<sub>1</sub>B<sub>1</sub>,  
 $E_{1,k}$  aktiver Erddruck mit Nutzlast auf die Ankerwand DB,  
 $E_{21,k}$  Erddruckkraft in der lotrechten Trennfuge F<sub>1</sub>B<sub>1</sub>.

Die Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge ergibt sich aus den Ungleichungen in Abschn. 9.3.1.

### 9.3.4 Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge bei Einspannung der Uferwand

Der vorstehend erläuterte Nachweis der Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge kann mit hinreichender Genauigkeit auch für im Boden eingespannte Uferwände geführt werden. Bei diesen Wänden wird die tiefe Gleitfuge zwischen Fußpunkt der Ankerwand und dem Querkraftnullpunkt im Einspannbereich der Uferwand geführt. Dieser liegt an der Stelle des größten Einspannmoments. Seine Lage kann daher der Spundwandberechnung entnommen werden.

Der Erddruck ist in diesem Fall nur bis zum rechnermäßigen Spundwandfußpunkt zu ermitteln, die vorhandene Ankerkraft ist der Spundwandstatik für die eingespannte Wand zu entnehmen.

### 9.3.5 Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge bei eingespannter Ankerwand

Ist die Ankerwand eingespannt, ist sinngemäß nach Abschn. 9.3.4 die tiefe Gleitfuge zu dem rechnermäßigen Fußpunkt in Höhe des Querkraftnullpunkts im Einspannbereich der Ankerwand zu führen und festzulegen.

### 9.3.6 Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge bei Verankerungen mit Ankerplatten

Sind die Anker an einzelnen Ankerplatten mit einem lichten Abstand  $a$  verankert, ist der Nachweis der Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge für eine gedachte Ersatzankerwand zu führen, die um das Maß  $1/2 \cdot a$  vor den Ankerplatten angenommen wird.

### 9.3.7 Nachweis der Sicherheit gegen Aufbruch des Verankerungsbodens

Mit dem Nachweis der Sicherheit gegen Aufbruch des Verankerungsbodens wird nachgewiesen, dass die Bemessungswerte der widerstehenden horizontalen Kräfte vor Ankerplatten oder Ankerwänden von der Unterkante der Ankerplatte oder Ankerwand bis zur Oberkante Gelände mindestens gleich oder größer sind als die Summe aus dem horizontalen Anteil des Bemessungswertes der Ankerkraft, dem horizontalen Anteil des Bemessungswertes des Erddrucks auf die Ankerwand und einem etwaigen Wasserüberdruck.

Erddruck- und Erdwiderstand an der Ankerwand oder an einzelnen Ankerplatten werden nach DIN 4085 ermittelt. Eine nicht ständige Einwirkung (Nutzlast auf dem Gelände) darf nur angesetzt werden, wenn sie ungünstig wirkt. Das ist in der Regel bei