

Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen EAU 2020

12. Auflage



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

Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen EAU 2020

12. Auflage

*Herausgegeben vom
Arbeitsausschuss „Ufereinfassungen“
der Hafentechnischen Gesellschaft e. V.
und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.*

Herausgeber

*Arbeitsausschuss „Ufereinfassungen“
der HTG und der DGGT*

Hafentechnische Gesellschaft e. V. (HTG)
Neuer Wandrahm 4
20457 Hamburg

Deutsche Geotechnische Gesellschaft e. V. (DGGT)
Hollestr. 1g
45127 Essen

Schriftleitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Grabe
Institut für Geotechnik und Baubetrieb
Technische Universität Hamburg
Hamburger Schloßstraße 20
21079 Hamburg

© Bildquelle: bremenports

12. Auflage

■ Alle Bücher von Ernst & Sohn werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2021 Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Rotherstraße 21, 10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Print ISBN 978-3-433-03316-6

ePDF ISBN 978-3-433-61035-0

ePub ISBN 978-3-433-61034-3

oBook ISBN 978-3-433-61033-6

Umschlaggestaltung Design Pur GmbH, Berlin

Satz le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

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 Schiffsgrößen. 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 Sachverständes. 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*

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

- 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 Kaibelastung 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 Großschiffsliegeplätzen 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 Landeanlagen 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 Massenkräfte des Überbaus 525
 - Literatur 525

12	Dalben	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
13	Betrieb, Unterhaltung und Instandsetzung von Ufereinfassungen	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
	Anhang A Zeichenerklärung	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
	Stichwortverzeichnis	563

1

Sicherheits- und Nachweiskonzept

1.1 Grundlagen des Sicherheits- und Nachweiskonzepts für Ufereinfassungen

1.1.1 Allgemeines

Das Versagen eines Bauwerks kann sowohl durch Überschreiten des Grenzzustandes der Tragfähigkeit („ultimate limit state – ULS“, Bruch im Boden oder in der Konstruktion, Verlust der Lagesicherheit) als auch des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit („serviceability limit state – SLS“, zu große Verformungen) eintreten.

1.1.2 Normative Regelungen für Ufereinfassungen

Die grundsätzlichen Sicherheitsanforderungen für Bauwerke sind in den harmonisierten europäischen Normen festgelegt. Im Einzelnen sind dies für die verschiedenen Fachbereiche die folgenden Normen:

DIN EN 1990:	Grundlagen der Tragwerksplanung („EC 0“)
DIN EN 1991, EC 1:	Einwirkungen auf Tragwerke
DIN EN 1992, EC 2:	Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton und Spannbetontragwerken
DIN EN 1993, EC 3:	Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten
DIN EN 1994, EC 4:	Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton
DIN EN 1995, EC 5:	Bemessung und Konstruktion von Holzbauten
DIN EN 1996, EC 6:	Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten
DIN EN 1997, EC 7:	Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik
DIN EN 1998, EC 8:	Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben
DIN EN 1999, EC 9:	Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken

Die Basis der europäischen Baunormen bilden die Eurocodes „Grundlagen der Tragwerksplanung“ (DIN EN 1990) und „Einwirkungen auf Bauwerke“ (DIN EN 1991) mit mehreren Teilen und Anhängen. Sie sind Grundlage für die Bemessung im gesamten Bauwesen Europas. Auf diese beiden Grundnormen beziehen sich alle anderen acht Eurocodes mit ihren jeweiligen Teilen.

Sicherheitsnachweise sind grundsätzlich nach den europäischen Normen zu führen. Diese werden um nationale Regelungen und Normen, wie z. B. die Zahlenwerte der Teil-

sicherheitsbeiwerte, ergänzt. Die nationalen Regelungen und Normen dürfen den Regelungen in den europäischen Normen nicht widersprechen.

Für Standsicherheitsnachweise nach EAU sind DIN EN 1990; DIN EN 1991; DIN EN 1992; DIN EN 1993; DIN EN 1994; DIN EN 1995; DIN EN 1996; DIN EN 1997; DIN EN 1998; DIN EN 1999, insbesondere aber DIN EN 1997 – Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik –, von Bedeutung. Im ersten Teil (DIN EN 1997-1) werden Begriffe definiert und die zu führenden Grenzzustandsnachweise beschrieben und festgelegt. Ferner sind in informativen Anhängen erdstatische Berechnungsmodelle für Standsicherheitsberechnungen angegeben. Als Besonderheit werden europaweit drei Nachweisverfahren mit dem Teilsicherheitskonzept zur Wahl gestellt.

Mit der DIN 1054:2010-12 werden die besonderen deutschen Erfahrungen dazu ergänzt und Sicherheitsbeiwerte für die Anwendung der DIN EN 1997-1 in Deutschland festgelegt. DIN 1054:2010-12, DIN EN 1997-1:2010-12 und der nationale Anhang (DIN EN 1997-1/NA:2010-12) sind zum Handbuch EC7-1 (2015) zusammengefasst worden.

Aufgrund der langjährigen Erfahrungen mit den spezifischen Randbedingungen von Uferauffassungen (z. B. größere Verformungstoleranz gegenüber anderen Ingenieurbauwerken) werden in den EAU einige besondere Festlegungen für die Bemessung von Uferauffassungen getroffen, die auch von DIN EN 1997-1 und DIN 1054 abweichen können.

Besondere Festlegungen sind z. B.:

- fallweise niedrigere Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen und Beanspruchungen sowie Widerstände im Grenzzustand des Versagens (Abschn. 1.2.4, Tab. 1.1 und 1.3),
- Ermittlung eines charakteristischen resultierenden Wasserdrucks durch Verrechnung günstig und ungünstig wirkender Wasserdrücke, sofern physikalisch sinnvoll (siehe Abschn. 3.3.1),
- vereinfachte Ansätze des Wasserdrucks (siehe Abschn. 3.3.2) und
- Erddruckumlagerungen abhängig vom Herstellverfahren für Spundwände (siehe Abschn. 8.2.3.2).
- Erhöhung der rechnerischen Ankerkraft um 15 % zur robusten Ausführung von Spundwand-Bauteilen (s. Abschn. 9.2).

Im zweiten Teil der DIN EN 1997-2 werden Planung, Durchführung und Auswertung von Baugrunderkundungen geregelt. Wie für Teil 1 wurde diese Norm zusammen mit DIN 4020:2010-12 und dem nationalen Anwendungsdokument im Handbuch EC7-2 veröffentlicht.

Die Ausführung von Arbeiten des Spezialtiefbaus ist in europäischen Ausführungsnormen geregelt. Diese werden auf nationaler Ebene durch DIN SPEC konkretisiert.

Die Bemessungen für tiefreichende Bodenstabilisierungen (z. B. Düsenstrahlverfahren, Injektionen) sind auf deutscher Ebene in der DIN 4093 festgelegt.

Soweit in den Empfehlungen Normen zitiert sind, gilt deren aktuelle Fassung. Bei Abweichungen wird das Ausgabejahr angegeben. Die zitierten Normen sind am Ende des Kapitels angegeben.

1.1.3 Geotechnische Kategorien

Die Mindestanforderungen an Umfang und Qualität geotechnischer Untersuchungen, Berechnungen und Überwachungsmaßnahmen werden nach EC 7 in drei geotechnischen Kategorien beschrieben, die eine geringe (Kategorie 1), eine normale (Kategorie 2)

und eine hohe (Kategorie 3) geotechnische Schwierigkeit bezeichnen. Sie sind in DIN 1054, A 2.1.2 wiedergegeben. Ufereinfassungen sind grundsätzlich in die Kategorie 2, bei schwierigen Baugrundverhältnissen in die Kategorie 3 einzuordnen. Ein Fachplaner für Geotechnik ist stets einzubeziehen.

1.1.4 Bemessungssituationen

Für den Nachweis der Standsicherheit und die Zuordnung der Teilsicherheitsbeiwerte werden in DIN 1054, Abs. 6.3.3. Lastfälle definiert. Diese ergeben sich aus den Einwirkungskombinationen in Verbindung mit den Sicherheitsklassen bei den Widerständen. Für Ufereinfassungen gelten dabei folgende Einstufungen.

1.1.4.1 Bemessungssituation (BS-P)

Belastungen aus Erddruck (bei nicht konsolidierten, bindigen Böden getrennt für den Anfangs- und Endzustand) und aus Wasserüberdruck bei häufig auftretenden ungünstigen Außen- und Innenwasserständen (siehe Abschn. 3.3.2), Erddruckeinflüsse aus den normalen Nutzlasten, aus normalen Kranlasten und Pfahllasten, unmittelbar einwirkende Auflasten aus Eigengewicht und normaler Nutzlast.

1.1.4.2 Bemessungssituation (BS-T)

Vorübergehende Situationen (transient situations), die sich auf zeitlich begrenzte Zustände beziehen, werden der Bemessungssituation BS-T zugeordnet, z. B. im Bauzustand oder bei der Instandsetzung; im Wasserbau neben den ständigen und während der Funktionszeit des Bauwerks regelmäßig auftretenden veränderlichen Einwirkungen der BS-P, z. B. begrenzte Kolkbildung durch Strömung oder Schiffsschrauben, Wasserüberdruck bei selten auftretenden ungünstigen Außen- und Innenwasserständen (siehe Abschn. 3.3.2) oder Wellenlasten gemäß Abschn. 4.3.

1.1.4.3 Bemessungssituation (BS-A)

Wie Bemessungssituation BS-T, jedoch mit außergewöhnlichen Bemessungssituationen wie außerplanmäßigen Auflasten auf größerer Fläche, eine ungewöhnlich große Abflachung einer Unterwasserböschung vor einem Spundwandfuß, eine ungewöhnliche Kolkbildung durch Strömung oder Schiffsschrauben, Wasserüberdrücke nach extremen Wasserständen (siehe Abschn. 3.3.2 bzw. 6.2), Wasserüberdruck nach einer außergewöhnlichen Überflutung der Ufereinfassung, Kombinationen von Erd- und Wasserdrücken mit Wellenlasten aus selten auftretenden Wellen (siehe Abschn. 4.3), Kombination von Erd- und Wasserdrücken mit Treibgutstoß gemäß Abschn. 6.2.5, alle Lastkombinationen in Verbindung mit Eisgang bzw. Eisdruck.

1.1.4.4 Extremfall

Beim Zusammentreffen äußerst unwahrscheinlicher Einwirkungskombinationen können nach DIN 1054, Abschn. A 2.4.7.6.1 A(4) und A 2.4.7.6.3 A(5) die Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen und Widerstände $\gamma_F = \gamma_R = 1,0$ gesetzt werden. Die Kombinationsbeiwerte werden nach Abschn. 1.2.4 zu $\psi = 1,0$ gesetzt.

Beispiele hierfür sind das Zusammentreffen extremer Wasserstände bei gleichzeitigen extremen Wellenlasten aus Sturzbrechern gemäß Abschn. 4.3.6, extreme Wasserstände bei gleichzeitigem restlosen Ausfall einer Entwässerung/Drainage (vgl. Abschn. 6.2), Kombinationen aus drei gleichzeitig wirkenden kurzfristigen Ereignissen, wie z. B.

Hochwasser (HHTw, vgl. Abschn. 6.2), selten auftretenden Wellen (vgl. Abschn. 4.3) und Treibgutstoß (vgl. Abschn. 6.2).

1.2 Nachweise für Ufereinfassungen

1.2.1 Grundlagen für die Nachweisführung

Der Standsicherheitsnachweis einer Ufereinfassung muss insbesondere enthalten:

- Angaben zur Nutzung der Anlage,
- zeichnerische Darstellung des Bauwerks mit allen wichtigen geplanten Bauwerksabmessungen,
- kurze Beschreibung des Bauwerks, insbesondere mit allen Angaben, die aus den Zeichnungen nicht klar erkennbar sind,
- Entwurfswert der Sohllentiefe,
- charakteristische Werte aller Einwirkungen,
- Bodenschichtung und zugehörige charakteristische Werte der Bodenkenngrößen,
- maßgebende freie Wasserstände, bezogen auf NHN (Normalhöhennull, früher NN: Normalnull) oder ein örtliches Pegelnul, sowie zugehörige Grundwasserstände (Hochwasserfreiheit, Überflutungsfreiheit),
- Einwirkungskombinationen bzw. Lastfälle,
- geforderte bzw. eingeführte Teilsicherheitsbeiwerte,
- vorgesehene Baustoffe und deren Festigkeiten bzw. Widerstände,
- alle Daten über Bauzeiten und Art der Baudurchführung mit den maßgebenden Bauzuständen,
- Darstellung und Begründung des vorgesehenen Gangs der Nachweise,
- Angabe des verwendeten Schrifttums und sonstiger Berechnungshilfsmittel.

1.2.2 Nachweisverfahren

1.2.2.1 Analytische Verfahren

Für die geotechnischen Nachweise nach den einschlägigen Normen finden im Regelfall analytische Modelle unter Ansatz von Bruchmechanismen Anwendung. Die maßgeblichen Gleitfugen im Baugrund werden dabei vorgegeben bzw. in Variationsuntersuchungen ermittelt. Die nachzuweisende Sicherheit soll die Unsicherheiten des erdstatischen Nachweises, der Baugrunderkundung und der Bauausführung abdecken. Häufig ist darin auch sekundär eine Verformungsbegrenzung enthalten.

1.2.2.2 Numerische Simulationen

Für Berechnungen des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit (Verformungen) haben sich inzwischen numerische Methoden wie z. B. die Finite-Elemente-Methode (FEM) etabliert. Ein Beispiel für eine umfassende numerische Simulation der Verformung einer Kaikonstruktion infolge der Hinterfüllung ist in Mardfeld (2005) zu finden. Der Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit kann für Erdbauwerke mithilfe der sogenannten φ' - c' -Reduktion nachgewiesen werden. Die FEM hat gegenüber den konventionellen Ansätzen wie dem Gleitkreisverfahren den Vorteil, dass die Scherfuge sich frei einstellen kann und damit zutreffendere Ergebnisse als mittels angenommener ebener oder gekrümmter Bruchkörper Geometrien vorgeben kann. Für die Nachweise

der Tragfähigkeit von Struktur-Boden-Interaktionsproblemen bietet sich die Methode Z^* an, bei der die Beanspruchungen der Bauteile im Gebrauchszustand ermittelt und dann in eine konventionelle Nachweisführung eingesetzt werden. Eine allein FEM-basierte Nachweisführung des Grenzzustandes ist derzeit umstritten. Hinsichtlich der Abbildung des Grenzzustandes der Tragfähigkeit und der Einführung der Sicherheitsbeiwerte gibt es noch keine allgemein verbindlichen Festlegungen. Numerische Simulationen erfordern eine Modellbildung unter Beachtung eines korrekten Spannungs- und Verformungszustandes, eines ausreichend großen Untergrundausschnitts, der Dränagebedingungen des Bodens und vor allem Stoffmodelle für die anstehenden Bodenarten, die die für das Bauwerk relevanten Phänomene des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens abbilden. Siehe hierzu u. a. die Empfehlungen des Arbeitskreises „Numerik in der Geotechnik“ (EANG, 2014).

1.2.2.3 Beobachtungsmethode

Für komplexe Bauwerke, bei denen das Tragverhalten nicht mit ausreichender Sicherheit in Modellen abgebildet werden kann, sollte die Beobachtungsmethode nach DIN EN 1997-1 eingesetzt werden. Dabei werden Messungen am Bauwerk oder im Baugrund durchgeführt und mit Prognose- bzw. Alarmwerten verglichen. Die bei Überschreitung von Alarmwerten durchzuführenden Gegen- und Sicherungsmaßnahmen sind fester Bestandteil der Beobachtungsmethode. Als Grundlage für die Bewertung der gemessenen Größen bieten sich Verformungen und Kräfte aus der numerischen Simulation an.

1.2.2.4 Versuche

Mit Versuchen kann das Tragverhalten sowohl einzelner geotechnischer Elemente als auch komplexer geotechnischer Tragwerke ermittelt werden. Sie können als Großversuch im Maßstab 1 : 1 (z. B. Probelastungen an Pfählen oder Ausziehversuche an Ankern) oder als skalierte Modellversuche ausgeführt werden. Skalierte Modellversuche erfordern die Einhaltung der sich aus der Ähnlichkeitstheorie ergebenden Modellgesetze, wenn die Versuchsbeobachtungen am Modell auf die Natur übertragen werden sollen. Die unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten der verschiedenen physikalischen Größen schränken die Übertragbarkeit ein. Dies gilt besonders für die Geotechnik, in der der Spannungszustand im Baugrund das Spannungs-Verformungs-Verhalten zwar entscheidend beeinflusst, dieser aber nur schwer abbildbar ist. Hier können Modellversuche in einer geotechnischen Zentrifuge durchgeführt werden, bei denen der Boden unter einem realistischen Spannungsniveau steht und so das druckabhängige Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Bodens korrekt abgebildet wird. Für Details zu Zentrifugenversuchen wird auf das Technical Committee TC 104 „Physical Modelling in Geotechnics“ der International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE) verwiesen.

1.2.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Verformungsnachweise sind für alle Bauteile vorzunehmen, deren Funktion durch Verformungen beeinträchtigt oder aufgehoben werden kann. Die Verformungen werden mit den charakteristischen Werten der Einwirkungen und Bodenreaktionen berechnet und müssen geringer als die für eine einwandfreie Funktion des Bauteils oder Gesamt-

bauwerks zulässigen Verformungen sein. Gegebenenfalls ist mit oberen und unteren Grenzwerten der charakteristischen Werte zu rechnen.

Insbesondere bei den Verformungsnachweisen ist der zeitliche Verlauf der Einwirkungen zu berücksichtigen, um auch kritische Verformungszustände während verschiedener Betriebs- und Bauzustände zu erfassen. Zur Abschätzung der im Gebrauchszustand zu erwartenden Verformungen eignen sich insbesondere numerische Methoden.

1.2.4 Grenzzustand der Tragfähigkeit

Der rechnerische Nachweis der Tragfähigkeit erfolgt üblicherweise anhand analytischer Verfahren für die Grenzzustände STR und GEO-2 mithilfe von Bemessungswerten (Index d) für Einwirkungen oder für Beanspruchungen und Widerstände, für den Grenzzustand GEO-3 mithilfe von Bemessungswerten für Einwirkungen oder für Beanspruchungen und Bodenkennwerte.

Der Sicherheitsnachweis wird nach folgender Grundgleichung geführt:

$$E_d \leq R_d$$

E_d Bemessungswert der Summe der Einwirkungen oder Beanspruchungen,
 R_d Bemessungswert der Widerstände, der sich aus der Summe der Widerstände des Bodens oder konstruktiver Elemente ergibt

Für Nachweise des Grenzzustandes des Verlustes der Lagesicherheit (EQU) oder des Versagens durch hydraulischen Grundbruch (HYD) oder Auftrieb (UPL) werden die Bemessungswerte der günstig und ungünstig oder stabilisierend und destabilisierend wirkenden Einwirkungen einander gegenübergestellt und die Einhaltung der jeweiligen Grenzzustandsbedingung nachgewiesen. Widerstände treten bei diesen Nachweisen nicht auf.

Für die Nachweise des Grenzzustandes der Tragfähigkeit werden sechs Fälle unterschieden:

Verlust der Lagesicherheit/Kippen	EQU
Aufschwimmen	UPL
Hydraulischer Grundbruch	HYD
Versagen oder große Verformungen des Tragwerks oder seiner Teile	STR
Versagen oder sehr große Verformung des Baugrunds	GEO-2
Grenzzustand des Verlusts der Gesamtstand-sicherheit	GEO-3

DIN EN 1997-1 lässt drei Möglichkeiten der Führung der Sicherheitsnachweise zu. Diese sind mit dem Begriff „Nachweisverfahren 1–3“ bezeichnet. Bei Verfahren 1 werden zwei Gruppen von Beiwerten betrachtet, die auf zwei getrennte Nachweise angewendet werden. Bei den Verfahren 2 und 3 ist ein Nachweis mit einer Gruppe von Beiwerten maßgeblich.

Bei den Verfahren 1 und 2 werden die Beiwerte grundsätzlich entweder auf Einwirkungen oder Beanspruchungen und auf Widerstände angewendet. DIN 1054 legt jedoch

fest, dass zunächst die charakteristischen bzw. repräsentativen Beanspruchungen $E_{G_{k,i}}$ bzw. $E_{Q_{rep,i}}$ (z. B. Querkkräfte, Auflagerkräfte, Biegemomente, Spannungen in den maßgebenden Schnitten durch das Bauwerk und in Berührungsflächen zwischen Bauwerk und Baugrund) ermittelt werden und darauf die Beiwerte anzuwenden sind. Dieses Verfahren wird auch Verfahren 2* genannt.

Bei Verfahren 3 werden Beiwerte auf nicht baugrundbedingte Einwirkungen oder Beanspruchungen und auf die Bodenkenngrößen angewendet. Durch den Baugrund bedingte Einwirkungen oder Beanspruchungen werden aus mit Beiwerten beaufschlagten Bodenkenngrößen ermittelt.

Nach DIN 1054 ist für geotechnische Nachweise der Grenzzustände STR und GEO-2 das Nachweisverfahren 2 (2*), für Nachweise des Grenzzustandes GEO-3 das Nachweisverfahren 3 anzuwenden.

Die in DIN 1054 festgelegten Teilsicherheitsbeiwerte sind in den Tab. 1.1–1.3 für die verschiedenen Bemessungssituationen (siehe Abschn. 1.1.4) wiedergegeben.

Anmerkungen:

- Im Grenzzustand des Versagens durch Verlust der Gesamtstandsicherheit GEO-3 sind die Teilsicherheitsbeiwerte für die Scherfestigkeit Tab. 1.2 zu entnehmen, Herausziehungswiderstände werden mit Teilsicherheitsbeiwerten nach STR und GEO-2 beaufschlagt.
- Der Teilsicherheitsbeiwert für den Materialwiderstand des Stahlzugglieds aus Spannstahl und Betonstahl ist für die Grenzzustände GEO-2 und GEO-3 in DIN EN 1992-1-1 mit $\gamma_M = 1,15$ angegeben.
- Der Teilsicherheitsbeiwert für den Materialwiderstand von flexiblen Bewehrungselementen ist für die Grenzzustände GEO-2 und GEO-3 in EBGEO (2010) angegeben.

Sofern größere Verschiebungen und Verformungen des Bauwerks die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks nicht beeinträchtigen, wie es bei Uferbefestigungen, Häfen und Wasserstraßen der Fall sein kann, darf in begründeten Fällen der Teilsicherheitsbeiwert γ_G im Fall des Erd- und Wasserdruckes herabgesetzt werden (DIN 1054, A 2.4.7.6.1 A(3)). In den EAU wird davon in Form der Beiwerte $\gamma_{G,red}$ (Tab. 1.1) und $\gamma_{R,e,red}$ (Tab. 1.3) Gebrauch gemacht. Ferner werden für Beanspruchungen aus ständigen und ungünstigen veränderlichen Einwirkungen in der Bemessungssituation BS-A die Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_G = \gamma_Q = 1,00$ gesetzt.

Bei der Bestimmung eines Bemessungswertes von Einwirkungen (F_d) nach DIN EN 1990 muss dieser entweder direkt festgelegt oder aus repräsentativen Werten abgeleitet werden:

$$F_d = \gamma_F \cdot F_{rep}$$

mit

$$F_{rep} = \psi \cdot F_k$$

γ_F Teilsicherheitsbeiwert
 ψ Kombinationsbeiwert

Für ständige Einwirkungen und für die Leiteinwirkung der veränderlichen Einwirkungen gilt:

$$F_{rep} = F_k$$

Tab. 1.1 Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen und Beanspruchungen (nach DIN 1054:2010-12, Tab. A.2.1 mit Ergänzungen) für Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit.

Einwirkung bzw. Beanspruchung	Formelzeichen	Bemessungssituation		
		BS-P	BS-T	BS-A
HYD und UPL: Grenzzustand des Versagens durch hydraulischen Grundbruch und Aufschwimmen				
Destabilisierende ständige Einwirkungen ^{a)}	$\gamma_{G,dst}$	1,05	1,05	1,00
Stabilisierende ständige Einwirkungen	$\gamma_{G,stb}$	0,95	0,95	0,95
Destabilisierende veränderliche Einwirkungen	$\gamma_{Q,dst}$	1,50	1,30	1,00
Stabilisierende veränderliche Einwirkungen	$\gamma_{Q,stb}$	0	0	0
Strömungskraft bei günstigem Untergrund	γ_H	1,45	1,45	1,25
Strömungskraft bei ungünstigem Untergrund	γ_H	1,90	1,90	1,45
EQU: Grenzzustand des Verlusts der Lagesicherheit				
Ungünstige ständige Einwirkungen	$\gamma_{G,dst}$	1,10	1,05	1,00
Günstige ständige Einwirkungen	$\gamma_{G,stb}$	0,90	0,90	0,95
Ungünstige veränderliche Einwirkungen	γ_Q	1,50	1,25	1,00
STR und GEO-2: Grenzzustand des Versagens von Bauwerken, Bauteilen und Baugrund				
Beanspruchungen aus ständigen Einwirkungen allgemein ^{a)}	γ_G	1,35	1,20	1,00
Beanspruchungen aus ständigen Einwirkungen für die Bemessung der Verankerung ^{b)}	γ_G	1,35	1,20	1,10
Beanspruchungen aus günstigen ständigen Einwirkungen ^{c)}	$\gamma_{G,inf}$	1,00	1,00	1,00
Beanspruchungen aus ständigen Einwirkungen aus Erdruchedruck	$\gamma_{G,EO}$	1,20	1,10	1,00
Wasserdruck bei bestimmten Randbedingungen ^{d)}	$\gamma_{G,red}$	1,20	1,10	1,00
Wasserdruck bei bestimmten Randbedingungen für die Bemessung der Verankerung ^{b)}	$\gamma_{G,red}$	1,20	1,10	1,10
Beanspruchung aus ungünstigen veränderlichen Einwirkungen ^{e)}	γ_Q	1,50	1,30	1,00
Beanspruchungen aus ungünstigen veränderlichen Einwirkungen ^{f)} für die Bemessung der Verankerung ^{b)}	γ_Q	1,50	1,30	1,10
Beanspruchung aus günstigen veränderlichen Einwirkungen	γ_Q	0	0	0
GEO-3: Grenzzustand des Versagens durch Verlust der Gesamtstandsicherheit				
Ständige Einwirkungen	γ_G	1,00	1,00	1,00
Ungünstige veränderliche Einwirkungen	γ_Q	1,30	1,20	1,00
SLS: Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit				
$\gamma_G = 1,00$ für ständige Einwirkungen bzw. Beanspruchungen				
$\gamma_Q = 1,00$ für veränderliche Einwirkungen bzw. Beanspruchungen				

- a) Die ständigen Einwirkungen verstehen sich einschließlich ständigen und veränderlichen Wasserdrucks. In BS-A gilt abweichend von DIN 1054:2010-12 $\gamma_G = 1,00$, außer für die Nachweise der Verankerung.
- b) Die Bemessung der Verankerung (Verpressanker, Mikropfähle, Zugpfähle) umfasst bei verankerten Stützbauwerken auch den Nachweis der Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge (Abschn. 9.3).
- c) Wenn bei der Ermittlung der Bemessungswerte der Zugbeanspruchung eine gleichzeitig wirkende charakteristische Druckbeanspruchung aus günstigen ständigen Einwirkungen angesetzt wird, ist diese mit dem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{G,inf}$ zu berücksichtigen (DIN 1054, 7.6.3.1 A(2)).
- d) Bei Ufereinfassungen, bei denen größere Verschiebungen schadlos aufgenommen werden können, dürfen die Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{G,red}$ für den Wasserdruck verwendet werden, wenn die Voraussetzungen nach Abschn. 8.2.1.3 gegeben sind (DIN 1054, A 2.4.7.6.1 A(3)).
- e) In BS-A gilt abweichend von DIN 1054:2010-12 $\gamma_Q = 1,00$, außer für die Nachweise der Verankerung.
- f) Die ständigen Einwirkungen verstehen sich einschließlich ständigen und veränderlichen Wasserdrucks.

Tab. 1.2 Teilsicherheitsbeiwerte für geotechnische Kenngrößen (DIN 1054:2010-12, Tab. A.2.2).

Bodenkenngröße	Formelzeichen	Bemessungssituation		
		BS-P	BS-T	BS-A
HYD und UPL: Grenzzustand des Versagens durch hydraulischen Grundbruch und Aufschwimmen				
Reibungsbeiwert $\tan \varphi'$ des dränierten Bodens und Reibungsbeiwert $\tan \varphi_u$ des undrännierten Bodens	$\gamma_{\varphi'}$, γ_{φ_u}	1,00	1,00	1,00
Kohäsion c' des dränierten Bodens und Scherfestigkeit c_u des undrännierten Bodens	$\gamma_{c'}$, γ_{c_u}	1,00	1,00	1,00
GEO-2: Grenzzustand des Versagens von Bauwerken, Bauteilen und Baugrund				
Reibungsbeiwert $\tan \varphi'$ des dränierten Bodens und Reibungsbeiwert $\tan \varphi_u$ des undrännierten Bodens	$\gamma_{\varphi'}$, γ_{φ_u}	1,00	1,00	1,00
Kohäsion c' des dränierten Bodens und Scherfestigkeit c_u des undrännierten Bodens	$\gamma_{c'}$, γ_{c_u}	1,00	1,00	1,00
GEO-3: Grenzzustand des Versagens durch Verlust der Gesamtstandsicherheit				
Reibungsbeiwert $\tan \varphi'$ des dränierten Bodens und Reibungsbeiwert $\tan \varphi_u$ des undrännierten Bodens	$\gamma_{\varphi'}$, γ_{φ_u}	1,25	1,15	1,10
Kohäsion c' des dränierten Bodens und Scherfestigkeit c_u des undrännierten Bodens	$\gamma_{c'}$, γ_{c_u}	1,25	1,15	1,10

Tab. 1.3 Teilsicherheitsbeiwerte für Widerstände (nach DIN 1054:2010-12, Tab. A.2.3 mit Ergänzungen).

Widerstand	Formelzeichen	Bemessungssituation		
		BS-P	BS-T	BS-A
STR und GEO-2: Grenzzustand des Versagens von Bauwerken, Bauteilen und Baugrund				
Bodenwiderstände				
Erdwiderstand und Grundbruchwiderstand	$\gamma_{R,e}$, $\gamma_{R,v}$	1,40	1,30	1,20
Erdwiderstand bei der Ermittlung des Biegemomentes ^{a)}	$\gamma_{R,e,red}$	1,20	1,15	1,10
Gleitwiderstand	$\gamma_{R,h}$	1,10	1,10	1,10
Pfahlwiderstände aus statischen und dynamischen Pfahlprobelastungen				
Fußwiderstand	γ_b	1,10	1,10	1,10
Mantelwiderstand (Druck)	γ_s	1,10	1,10	1,10
Gesamtwiderstand (Druck)	γ_t	1,10	1,10	1,10
Mantelwiderstand (Zug)	$\gamma_{s,t}$	1,15	1,15	1,15
Pfahlwiderstände auf der Grundlage von Erfahrungswerten				
Druckpfähle	γ_b , γ_s , γ_t	1,40	1,40	1,40
Zugpfähle (nur in Ausnahmefällen)	$\gamma_{s,t}$	1,50	1,50	1,50
Herauszieh Widerstände				
Boden- bzw. Felsnägel	γ_a	1,40	1,30	1,20
Verpresskörper von Verpressankern	γ_a	1,10	1,10	1,10
Flexible Bewehrungselemente	γ_a	1,40	1,30	1,20

- a) Abminderung ausschließlich bei der Ermittlung des Biegemomentes. Bei Ufereinfassungen, bei denen größere Verschiebungen schadlos aufgenommen werden können, dürfen die Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{R,e,red}$ für den Erdwiderstand verwendet werden, wenn die Voraussetzungen nach Abschn. 8.2.1.2 gegeben sind (DIN 1054, A.2.4.7.6.1A(3)).

Für Uferbauwerke werden im Regelfall die Kombinationsbeiwerte $\psi = 1,00$ gesetzt. Beim Nachweis der Sicherheit gegen Aufschwimmen (UPL) und der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch (HYD) sind die Bemessungswerte F_d grundsätzlich ohne Berücksichtigung von Kombinationsbeiwerten zu ermitteln.

Literatur

- Andrews, J.D. und Moss, T.R. (1993). *Reliability and Risk Assessment*. Burnt Mill: Longman Scientific & Technical.
- EANG (2014). *Empfehlungen des AK Numerik in der Geotechnik*, (Hrsg. DGGT). Berlin: Ernst & Sohn.
- EBGEO (2010). *Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen (EBGEO)*, (Hrsg. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V.), 2. Aufl., 327 Seiten. Berlin: Ernst & Sohn.
- Heibaum, M. und Herten, M. (2007). Finite-Element-Methode für geotechnische Nachweise nach neuer Normung? *Bautechnik* 84 (9): 627–635.
- Mardfeldt B. (2005). Zum Tragverhalten von Kaikonstruktionen im Gebrauchszustand. Dissertation. Veröffentlichungen des Arbeitsbereichs Geotechnik und Baubetrieb der TU Hamburg-Harburg, Heft 11.
- Richwien, W. und Lesny, K. (2003). Risikobewertung als Schlüssel des Sicherheitskonzepts – Ein probabilistisches Nachweiskonzept für die Gründung von Offshore-Windenergieanlagen. *Erneuerbare Energien* 13 (2): 30–35.
- Schwab, R. und Kayser, J. (2002). Continuous model validation for large navigable lock. International Symposium on Identification and Determination of Soil and Rock Parameters, PARAM 2002, Paris.
- Schweiger, H.F. (2017). *Numerik in der geotechnischen Nachweisführung*. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 101. Karlsruhe: Eigenverlag.
- Schuëller, G.I. (1981). *Einführung in die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Tragwerken*. Berlin: Ernst & Sohn.

Normen und Vorschriften

- DIN 1054: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1.
- DIN 4020 Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-2.
- DIN 4093 (2015). Bemessung verfestigter Bodenkörper – Hergestellt im Düsenstrahl-, Deep Mixing- oder Injektionsverfahren.
- DIN EN 1990 Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.
- DIN EN 1991 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke.
- DIN EN 1992 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken.
- DIN EN 1993 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten.
- DIN EN 1994 Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton.
- DIN EN 1995 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten.
- DIN EN 1996 Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten.