

Mitteilungsblatt

der
Bundesanstalt für Wasserbau
Nr. 87

Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen

Karlsruhe • Mai • 2004

Herausgeber (im Eigenverlag):

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe
Postfach 21 02 53, 76152 Karlsruhe
Telefon: 0721 9726-0
Telefax: 0721 9726-4540
e-mail: info.karlsruhe@baw.de
Internet: <http://www.baw.de>

Übersetzung, Nachdruck oder sonstige Vervielfältigung - auch auszugsweise - ist nur mit Genehmigung des Herausgebers gestattet.

© BAW 2004

Titelbild: Fahrversuche am Wesel-Datteln-Kanal, Unterwasser der Schleuse Flaesheim (WDK-km 46,500), Oktober 2002 - böschungsnaher Fahrt des Schleppers Mignon mit annähernd kritischer Schiffsgeschwindigkeit, im Hintergrund die MS Main

Vorwort

Böschungs- und Sohlensicherungen werden in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung nach dem *Merkblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen* (MAR) ausgeführt, das Standardbauweisen vorschlägt, die sich in der Vergangenheit bewährt haben. Diese Standardbauweisen sind jedoch nur unter bestimmten Voraussetzungen im Hinblick auf die Wellen- und Strömungsbelastung durch die Schifffahrt sowie auf den Untergrund anwendbar. Nach einer Bearbeitungszeit von über 10 Jahren wird mit dieser Veröffentlichung ein neues Bemessungskonzept für Böschungs- und Sohlensicherungen vorgestellt, das einen allgemeineren fachwissenschaftlichen Ansatz beschreibt und über das MAR hinausgeht. Berücksichtigt werden können neben den hierfür speziell entwickelten geotechnischen Berechnungsansätzen und den bereits bekannten wasserbaulichen Berechnungsgrundlagen nun auch

- die Wirkungen von Schraubenstrahl und Bugstrahlruder auf Böschung und Sohle,
- Sekundärwellen von schnell fahrenden, kleinen Schiffen,
- der Einfluss des Verhältnisses von Schiffslänge zu Gewässerbreite,
- Rollbrecher bzw. die Wiederauffüllungsströmung sowie
- Windwellen.

Die in die Bemessung eingehenden Parameter des fahrenden Schiffes wurden unter der Voraussetzung festgelegt, dass die in den Verkehrsvorschriften vorgeschriebenen Geschwindigkeiten und Fahrweisen eingehalten werden. Da die Belastungen der Böschungssicherungen vor allem bei Annäherung und Erreichen der kritischen Schiffsgeschwindigkeiten überproportional zunehmen, würde die Berücksichtigung dieses Falls zu unwirtschaftlichen Bauweisen führen. Daher wird – wie bisher auch bei einer Bemessung nach dem MAR – davon ausgegangen, dass die Schiffe, auch unter dem Gesichtspunkt einer wirtschaftlichen Fahrweise, eine maximale Geschwindigkeit von 97 % der kritischen Schiffsgeschwindigkeit nicht überschreiten.

Durch größere, sehr leistungsstarke Sportboote oder allein fahrende Schubschiffe können sich gegebenenfalls durchaus noch höhere Wellenbelastungen an den Böschungssicherungen einstellen als sie sich bei den hier zu Grunde gelegten Schiffen und Fahrweisen ergeben. Der Ansatz dieser heute sehr seltenen Lastfälle als Bemessungslastfall würde zu deutlich höheren Herstellungskosten von Böschungs- und Sohlensicherungen führen. Unter Beachtung der sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeit wird empfohlen, die aus solchen Überbeanspruchungen entstehenden Schäden im Rahmen der Unterhaltung zu beheben. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass hier unter Beachtung der Wirtschaftlichkeit auch zu prüfen sein wird, ob die heute geltenden Verkehrsvorschriften zu überarbeiten sind.

Darüber hinaus ist generell die Entwicklung neuer Antriebe und Schiffsformen zu beobachten, um bei gravierenden Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit von Böschungssicherungen rechtzeitig reagieren zu können. Dazu ist erforderlich, dass die Unterhaltungsaufwendungen für Böschungssicherungen in Zukunft stärker systematisch dokumentiert und ausgewertet werden.

In der vorliegenden Veröffentlichung werden die theoretischen und experimentellen Grundlagen für eine Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen dargelegt. Die Veröffentlichung hat somit nicht das Ziel, als praktische Arbeitshilfe für die Durchführung einer Bemessung verwendet zu werden. Als solche praktische Arbeitshilfe für den planenden Ingenieur wird das *Merkblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen* (MAR) auf der Grundlage dieser Veröffentlichung überarbeitet.

Die Veröffentlichung ist ein Gemeinschaftswerk der Arbeitsgruppe "Auskleidung von Wasserstraßen", an der Mitarbeiter der WSV, des BMVBW und der BAW sowie bei Einzelfragen externe Fachleute beteiligt waren. Für die intensive und erfolgreiche Mitarbeit und die Ausdauer bei der Diskussion der oft strittigen Fragen sowie für die Durchführung und Auswertung der notwendigen Fahrversuche möchte ich mich bei den Mitgliedern der Arbeitsgruppe bedanken. In diesen Dank einschließen möchte ich auch den ehemaligen Leiter der Arbeitsgruppe, Herrn Prof. Dr. Schulz (Universität der Bundeswehr München), die Fachkollegen vom "AK 17", einer Vereinigung von Fachleuten des Deckwerkbaus, sowie Herrn Prof. Dr. Römisch und Herrn Prof. Dr. Wagner (beide ehemals TU Dresden) und Herrn Dr. Daemrich (Universität Hannover), die das Werk mit ihren kritischen Fragen und Anregungen in den letzten Jahren begleitet haben.

Dr.-Ing. H.-H. Witte
Direktor und Professor
der Bundesanstalt für Wasserbau

Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen

Arbeitsgruppe „Auskleidung von Wasserstraßen“

seit Oktober 1992

Mitglieder:

ABROMEIT, Uwe	BOR, Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe
ALBERTS, Dirk	Dipl.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg
BARTNIK, Wolfgang	BDir, Wasserstraßen-Neubauamt Datteln
FISCHER, Uwe	BOR, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen Bonn
FLEISCHER, Petra	BOR, Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe
FUEHRER, Manfred (bis Februar 2000)	Dr. rer. nat., ehem. Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe
HEIBAUM, Michael	BDir, Dr.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe
KAYSER, Jan	BDir, Dr.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe
KNAPPE, Gerd	Dipl.-Ing., Wasserstraßen-Neubauamt Datteln
KÖHLER, Hans-Jürgen	Dipl.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe
LIEBRECHT, Arno	Dipl.-Ing., Wasser- und Schifffahrtsdirektion Mitte Hannover
REINER, Wilfried	LBDDir, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Mitte Hannover
SCHMIDT-VÖCKS, Dieter	LBDDir a. D., Wasser- und Schifffahrtsdirektion Mitte Hannover
SCHULZ, Hartmut (Obmann bis 1996)	Prof. Dr.-Ing., Universität der Bundeswehr München
SCHUPPENER, Bernd (Obmann seit 1996)	LBDDir, Dr.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe
SÖHNGEN, Bernhard	BDir, Prof. Dr.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe
SOYEAUX, Renald	Dr.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe

Inhalt

1	Vorbemerkung	15
2	Begriffe	17
3	Übersicht der hydraulischen Belastungen des Gewässerbetts	23
3.1	Allgemeines	23
3.2	Strömungen	23
3.3	Wellen	23
3.3.1	Allgemeines	23
3.3.2	Wirkung einer ungebrochenen auflaufenden Welle	24
3.3.3	Wirkung einer brechenden auflaufenden Welle	24
3.3.4	Wirkung einer uferparallel laufenden brechenden Welle	24
3.4	Wirkung des Wasserspiegelabsinks	25
3.4.1	Allgemeines	25
3.4.2	Langsam fallender Wasserspiegel	25
3.4.3	Schnell fallender Wasserspiegel	25
3.4.3.1	Allgemeines	25
3.4.3.2	Wirkung des Porenwasserüberdrucks	25
3.4.3.3	Größe und Verlauf des Porenwasserüberdrucks	25
3.5	Grundwasserzustrom	26
4	Sicherheits- und Bemessungskonzept	27
4.1	Allgemeines	27
4.2	Hydraulische Nachweise	28
4.2.1	Aspekte zur Festlegung der Bemessungsgröße	28
4.2.2	Empfehlungen für die hydraulische Bemessung	29
4.2.2.1	Primärwellenfeld	29
4.2.2.2	Sekundärwellenfeld	30
4.2.2.3	Schraubenstrahl	31
4.2.2.4	Windwellen	31
4.2.2.5	Empfehlungen für die hydraulische Bemessung im Regelfall	31
4.3	Geotechnische Nachweise	32
5	Ermittlung der hydraulischen Einwirkungen	33
5.1	Allgemeines	33
5.2	Daten zur Wasserstraße	33
5.2.1	Gewässergeometrie	33
5.2.2	Fahrrinnengeometrie	33
5.3	Daten zum Schiff	34

5.4	Schifffahrtsbedingte hydraulische Einwirkungen	35
5.4.1	Komponenten	35
5.4.2	Fahrsituationen	35
5.4.2.1	Normalfahrt	35
5.4.2.2	Manövrierfahrt	37
5.5	Größe von Schiffswellen (Bemessungssituation "Normalfahrt")	37
5.5.1	Hydraulisch wirksamer Kanal- bzw. Schiffsquerschnitt	38
5.5.1.1	Flachwassereinfluss	38
5.5.1.2	Grenzschichteneinfluss	43
5.5.2	Kritische Schiffsgeschwindigkeit der Kanalfahrt	44
5.5.3	Mittlerer Absunk und Rückströmungsgeschwindigkeit bei mittiger Kanalfahrt	45
5.5.4	Hydraulische Bemessungsgrößen und geotechnisch maßgebende Absunkparameter bei beliebiger Fahrposition	49
5.5.4.1	Definition der Wellenhöhe	49
5.5.4.2	Bugwellenhöhe und zugehörige Rückströmungsgeschwindigkeit ohne Exzentrizitätseinfluss	49
5.5.4.3	Heckwellenhöhe und zugehörige Rückströmungsgeschwindigkeit ohne Exzentrizitätseinfluss	49
5.5.4.4	Maximalwerte von Bug- und Heckwellenhöhe bei exzentrischer Fahrt	50
5.5.4.5	Wiederauffüllungsströmung	51
5.5.4.6	Vergößerung der Wellenhöhen bei Fahrt mit Driftwinkel	53
5.5.4.7	Absunkgeschwindigkeit von Schiffswellen	53
5.5.5	Sekundärwellen	55
5.5.5.1	Allgemeines	55
5.5.5.2	Berechnung der Sekundärwellenhöhen	57
5.5.5.3	Zusätzliche Sekundärwellen in Analogie zum unvollkommenen Wechselsprung	58
5.5.5.4	Sekundärwellen kleiner Boote bei Gleitgeschwindigkeit und ufernaher Fahrt	58
5.5.6	Begegnung und Überholung	59
5.6	Hydraulische Belastungen der Wasserstraße durch Propulsionsströmung (Schraubenstrahl)	59
5.6.1	Induzierte Anfangsgeschwindigkeit des Propellerstrahls im Stand (Schiffsgeschwindigkeit $v_S = 0$)	59
5.6.2	Geschwindigkeit des Propellerstrahls bei Schiffsgeschwindigkeit $v_S \neq 0$	61
5.6.3	Strahlausbreitungscharakteristik	62
5.6.3.1	Standardsituationen zur Strahlausbreitung	62
5.6.3.2	Abnahmecharakteristik der Zentralgeschwindigkeit	63
5.6.3.3	Berechnung der Strahlgeschwindigkeitsverteilung quer zur Strahlachse	65
5.6.3.4	Mehrschraubenantriebe	67
5.6.4	Vereinfachte Berechnung der maximalen Sohlgeschwindigkeit	67
5.6.5	Belastung durch Bugstrahlruder	68
5.7	Windstau und Windwellen	69
5.7.1	Allgemeines	69
5.7.2	Winddaten	70
5.7.3	Windwirkgebiet / Mindestwirkdauer	70
5.7.4	Windstau	71

5.7.5	Windwellen	72
5.8	Wellenverformung	74
5.8.1	Allgemeines	74
5.8.2	Wellenaufsteilen und -brechen	74
5.8.3	Diffraktion	76
5.8.4	Refraktion	77
5.8.5	Reflexion	77
5.8.6	Wellenauflauf	78
5.8.6.1	Auflaufende Wellen	78
5.8.6.2	Parallel laufende Wellen	79
5.8.7	Wellenhöhenänderung bei Übergang eines senkrechten Ufers auf ein Böschungsdeckwerk	80
5.9	Sonstige Wellen	80
5.9.1	Allgemeines	80
5.9.2	Schwall- und Sunkwellen	80
5.9.3	Hochwasserwellen	81
5.10	Porenwasserüberdruck in Abhängigkeit vom schnellen Wasserspiegelabsenk z_a	81
5.10.1	Allgemeines	81
5.10.2	Maximaler Wasserspiegelabsenk z_a und Absenkgeschwindigkeit v_{za}	81
5.10.3	Größe des Porenwasserüberdrucks Δu	82
6	Hydraulische Bemessung ungebundener Deckschichten aus Wasserbausteinen	85
6.1	Allgemeines	85
6.2	Steingröße bei Belastung durch Heckquerwellen	86
6.3	Steingröße bei Propulsionsströmung	87
6.3.1	Steingröße bei Strahlangriff	87
6.3.2	Steingröße zur Begrenzung der Kolkentiefe infolge Schraubenstrahl	88
6.4	Steingröße bei Belastung durch Sekundärschrägwellen	89
6.5	Steingröße bei Windwellen	89
6.6	Steingröße bei kombinierter Schiffs- und Windwellenbelastung	90
6.7	Steingröße bei Strömungsangriff	90
6.7.1	Steingröße bei weitgehend böschungsparallelem Strömungsangriff	90
6.7.2	Steingröße bei Böschungsbelastung durch Wiederauffüllungsströmung	91
6.8	Steingröße nach Technischen Lieferbedingungen für Wasserbausteine	91
6.9	Dicke der Deckschicht	92
6.10	Ermittlung hydraulisch gleichwertiger Deckwerke	93
6.11	Minstdicken	93
6.12	Deckwerkslänge in Böschungsfalldinie bei Wellenbelastung	94
6.12.1	Allgemeines	94
6.12.2	Oberhalb des Ruhewasserspiegels	94
6.12.3	Unterhalb des Ruhewasserspiegels	94
6.13	Konstruktive Festlegung beim Übergang eines senkrechten Ufers auf ein Böschungsdeckwerk	94

7	Geotechnische Bemessung von ungebundenen Deckschichten	97
7.1	Allgemeines	97
7.2	Lokale Standsicherheit durchlässiger Deckwerke	97
7.2.1	Allgemeines	97
7.2.2	Tiefenlage der kritischen Bruchfuge d_{krit}	97
7.2.3	Flächengewicht der Deckschicht gegen Abgleiten des Deckwerks auf einer Böschung	97
1.1.1.1	Allgemeines	97
7.2.3.2	Rechenverfahren	98
7.2.3.3	Hinweise bei geschichtetem Baugrund	99
7.2.4	Flächengewicht der Deckschicht gegen hydrodynamische Bodenverlagerungen	99
7.2.4.1	Allgemeines	99
7.2.4.2	Rechenverfahren	99
7.2.5	Flächengewicht der Deckschicht bei Berücksichtigung einer Fußstützung	99
7.2.5.1	Allgemeines	99
7.2.5.2	Bruchmechanismus 1 am Böschungsfußpunkt	100
7.2.5.3	Bruchmechanismus 2 bei einer Fußvorlage	101
7.2.5.4	Bruchmechanismus 2 bei einer Fußeinbindung	103
7.2.5.5	Bruchmechanismus 2 bei einer Fußspundwand	104
7.2.6	Flächengewicht der Deckschicht bei Berücksichtigung einer Deckwerksaufhängung	106
7.2.6.1	Allgemeines	106
7.2.6.2	Nachweis der äußeren Tragfähigkeit	106
7.2.6.3	Nachweis der inneren Tragfähigkeit	107
7.2.7	Böschungssicherung oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels	107
7.3	Lokale Standsicherheit dichter Deckwerke	107
7.3.1	Allgemeines	107
7.3.2	Flächengewicht der dichten Deckschicht gegen Abgleiten	107
7.3.3	Flächengewicht der dichten Deckschicht gegen Abheben	108
7.4	Nachweis der globalen Standsicherheit der wasserseitigen Böschung	108
8	Hydraulische Bemessung von Deckschichten aus Wasserbausteinen mit Teilverguss	111
9	Geotechnische Bemessung von Deckschichten aus Wasserbausteinen mit Teilverguss	111
9.1	Allgemeines	111
9.2	Lokale Standsicherheit durchlässiger Deckwerke mit teilvergossenen Deckschichten	111
9.3	Lokale Standsicherheit dichter Deckwerke mit teilvergossenen Deckschichten	111
9.4	Nachweis der globalen Standsicherheit der wasserseitigen Böschung	111
10	Literaturverzeichnis	113

11	Nomenklatur	125
11.1	Abkürzungen	125
11.2	Symbole	125

Anhang A

1 Vorbemerkung

In der vorliegenden Schrift werden ausführlich die Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen unter Berücksichtigung neuester Forschungsergebnisse vorgestellt. Es werden rechnerische Nachweise zur Standsicherheit und Erosionsfestigkeit von Uferböschungen an Kanälen und, mit Einschränkungen, an Flüssen genannt, die natürlichen oder schiffahrtsbedingten hydraulischen Einwirkungen ausgesetzt sind.

Die Schrift gliedert sich in drei wesentliche Teile:

- Im ersten Teil werden die verwendeten Begriffe definiert, die hydraulischen und bodenmechanischen Grundlagen erläutert und die Sicherheitsphilosophie und das Bemessungskonzept vorgestellt (s. Kap. 2 bis 4).
- Der zweite Teil befasst sich mit der Ermittlung der hydraulischen Einwirkungen (s. Kap. 5), die die Eingangsparameter für die Bemessung darstellen.
- Der dritte Teil beinhaltet die hydraulischen und geotechnischen Bemessungen (s. Kap. 6 und 7).

Der **Anwendungsbereich** der hydraulischen Bemessungsansätze erstreckt sich in erster Linie auf Wasserstraßen mit vorwiegend parallelem Uferverlauf, mit seitlich und tiefenmäßig begrenztem Fahrwasser, mit bis auf den Uferbereich nahezu konstanter Tiefe (keine Bermen), mit einem maximalen Verhältnis Wasserspiegelbreite/Schiffslänge von ca. $b_{WS}/L = 2/1$ und mit Schiffsverkehr in der für die Deckwerksbemessung maßgebenden Verdrängerfahrt (auch für Sportboote). Mit Einschränkungen können die vorgestellten Verfahren auch auf seeartige Kanalaufweitungen und staugeregelte Gewässer angewendet werden, wenn die Schiffe ufernah fahren und wenn der Uferverlauf regelmäßig ist, d. h. keine Nasen oder Trichter aufweist, an und in denen sich schiffserzeugte Wellen aufstauen können. Mit diesen Einschränkungen kann der Einfluss der Uferform, der Turbulenz und der Grundströmung auf die Wellenausbreitung vernachlässigt werden. Der Flachwassereinfluss ($b_{WS}/L > 2/1$) kann hinsichtlich der erreichbaren Schiffsgeschwindigkeiten und des Wasserspiegelabsinks in Schiffsnähe näherungsweise durch ein äquivalentes Kanalprofil berücksichtigt werden. Für das Abklingen der Wellenhöhen mit der Entfernung vom Schiff werden ebenfalls Näherungsgleichungen angegeben. Auch für die Fahrt von Sportbooten sowie kurzen, gedrunenen Schiffskörpern (Schubboote und Schlepper) werden Näherungsverfahren zur Abschätzung der schiffserzeugten hydraulischen Belastungen angeboten.

Für die folgenden Situationen werden in Kap. 5 keine Berechnungsverfahren zur Ermittlung der hydraulischen Bemessungsparameter (Wellenhöhe, Strömungsgeschwindigkeit) angeboten:

- Stark ungleichförmige Gewässerquerschnitte bzw. Gewässer mit unregelmäßigem Uferverlauf
- Nicht-konventionelle Propulsionsorgane wie Schotter-Propeller und Strahlantriebe
- Nicht-Verdränger wie Luftkissenboote und Sportboote im Gleiten
- Seeschiffe und andere Fahrzeuge, die von der üblichen Bauart von Binnenschiffen abweichen, z. B. solche mit Bugwulst (sie bilden andere Sekundärwellen aus)
- Froudesche Tiefenzahlen $v_S/\sqrt{g h_m} > 0,8$ (hier ändert sich das Sekundärwellensystem signifikant)
- Fahrten, bei denen die Kursachse von der Kanalachse stark abweicht (dabei verändern sich die Primär- und Sekundär-Wellensysteme wesentlich)

Sollten Messdaten, z. B. zu den schiffserzeugten Wellenhöhen, vorliegen, können die darauf aufbauenden Bemessungsverfahren für die erforderliche Steingröße (s. Kap. 6) direkt angewendet werden.

Bei der Bemessung der Steingrößen in Kapitel 6 werden die im Folgenden genannten Punkte nicht behandelt (die bodenmechanische Bemessung bleibt davon unbeeinflusst):

- Flachere Uferböschungen als ca. 1:5 (auf diesen werden ankommende Wellen signifikant verformt) und steilere als ca. 1:2
- Wellenverformungen im Böschungsbereich (sie werden aber indirekt in den Bemessungsverfahren, die sich auf Wellenhöhen am Böschungsfuß beziehen, berücksichtigt)
- Ufersicherungen mit Formsteinen, Gabionen oder Asphalt

Die Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen besteht aus einer hydraulischen und einer geotechnischen Bemessung (s. Bild 1.1). Beide Bemessungen sind unabhängig voneinander durchzuführen.

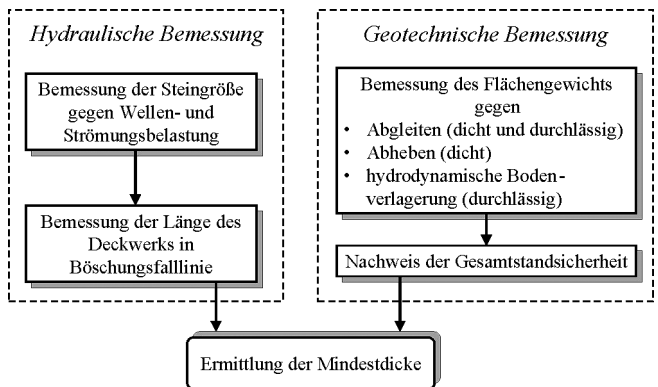


Bild 1.1 Ablauf der Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen

Bei der **hydraulischen Bemessung** wird die erforderliche Steingröße in Abhängigkeit von der Wellen- und Strömungsbelastung ermittelt, die auch die erforderliche Länge des Deckwerks in Böschungsfällinie bestimmt. Die **geotechnische Bemessung** dient der Bestimmung des erforderlichen Flächengewichts, um eine ausreichende Sicherheit gegen Abgleiten, Abheben und hydrodynamische Bodenverlagerung zu gewährleisten. Zusätzlich ist der geotechnische Nachweis der Gesamtstandsicherheit zu führen.

Die Ergebnisse der hydraulischen und der geotechnischen Bemessung sind im letzten Schritt Grundlage für die Ermittlung der erforderlichen Mindestdicke der Deckschicht. Dabei ist zusätzlich zu überprüfen, ob ein ausreichender Schutz gegen Schiffsanfahrungen, gegen Ankerwurf und UV-Strahlung sowie eine ausreichende Filtrationslänge gegen Korntransport gewährleistet ist.

Die hier vorgestellten Verfahren gelten in Verbindung mit folgenden **Regelwerken** für Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen jeweils in ihrer aktuellsten Fassung:

- Merkblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungen und Sohlensicherungen an Wasserstraßen /MAR/
- Merkblatt Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen /MAK/
- Merkblatt Anwendung von geotextilen Filtern an Wasserstraßen /MAG/
- Merkblatt Anwendung von hydraulisch und bitumengebundenen Stoffen zum Verguss von Wasserbausteinen an Wasserstraßen /MAV/
- Technische Lieferbedingungen für Wasserbausteine /TLW/
- Richtlinien für Regelquerschnitte von Schifffahrkanälen /BMV 1994/

2 Begriffe

Abgleiten: Spezieller Fall des \Rightarrow Böschungsbruches auf einer oberflächennahen, böschungsp parallelen Gleitfläche.

Absunkgeschwindigkeit: Geschwindigkeit, mit der der Wasserspiegel an einem Uferpunkt im Mittel absinkt.

Bodenverlagerung, hydrodynamische: Die durch \Rightarrow Porenwasserüberdruck im Boden entstehende Strömung des Grundwassers aus der Böschung ins freie Wasser führt bei unzureichender Auflast zu Deformationen in der Böschung (Auflockerung des Bodens, Hebung) und kann nach Erreichen des plastischen Grenzzustandes (Mohr-Coulombsche Bruchbedingungen) durch entsprechend hohen Porenwasserüberdruck zu schädlichen Kornverlagerungen ggf. auch böschungsabwärts im Boden unterhalb der Deckschicht führen.

Böschungsbruch: Abrutschen eines Teils der Uferböschung auf einer i. d. R. tiefen Gleitfläche infolge des Ausschöpfens des Scherwiderstandes des Bodens.

Brechende Welle: \Rightarrow Wellenbrechen

Bugstau: Aufstau des Wassers vor dem Bug über die Einflussbreite, verursacht durch ein beschleunigendes Schiff bzw. bei stationärer Fahrt durch eine raue Kanalberandung (Wasserspiegelanspannung); tritt im Gegensatz zur \Rightarrow Bugwelle über eine große Breite (Kanalbreite) auf.

Bugstrahlruder: In einem senkrecht zur Schiffsachse im Bugbereich angeordneten Rohr befindet sich eine Schiffsschraube (Standardausführung), die Wasser beschleunigt. Dadurch wird ein Querimpuls ausgeübt, der wie ein Ruder wirkt. Die größte Wirkung tritt bei kleinen Schiffsgeschwindigkeiten über Grund auf.

Bugwelle: Aufstau des anströmenden Wassers direkt vor dem Bug des Schiffes (Staupunkt), der die Bildung von \Rightarrow Sekundärwellen zu beiden Schiffsseiten hin initiiert.

Deckschicht: Die oberste Schicht eines \Rightarrow Deckwerks. Sie muss erosionsfest sein und gegen Ankerwurf und Schiffsanfahrung einen ausreichenden Widerstand besitzen.

Deckwerk: Durchlässige oder dichte Auskleidung eines Gewässers zur Verhinderung von Veränderungen des Gewässerbetts.

Ein durchlässiges Deckwerk ermöglicht den ungehinderten Wasseraustausch zwischen Untergrund und Wasserstraße. Es besteht i. Allg. aus einer Deckschicht und einem darunter liegenden Filter.

Ein dichtes Deckwerk verhindert den Wasseraustausch zwischen Wasserstraße und Untergrund. Es besteht aus einer dichten Deckschicht - i. Allg. mit einer darunter liegenden geotextilen Trennlage - oder aus einer durchlässigen Deckschicht auf einer darun-

ter liegenden Weichdichtung - i. Allg. mit einer geotextilen oder mineralischen Trennlage als Zwischenlage.

Diffraction: Trifft eine Wellenfront auf ein Hindernis, so hat das Wellenbeugung (Diffraction) zur Folge. Da jeder Punkt eines Wellenkammes Ausgangspunkt neuer kreisförmiger Elementarwellen ist, werden am wellenexponierten Ende des Hindernisses Wellen erzeugt, die sich im Wellenschatten hinter dem Hindernis ausbreiten. Die Geschwindigkeit bleibt dabei unverändert. Wellenhöhe und -richtung dagegen verändern sich an den offenen Rändern.

Düsenpropeller (Mantelpropeller): Zylinderförmig ummantelter Propeller zur Wirkungsgradsteigerung.

Einflussbreite (~, wirksame): Die wirksame Einflussbreite b_E entspricht derjenigen Breite, in der man sich das gesamte Rückstromfeld um ein Schiff konzentriert denken kann. Sie erlaubt die Berechnung der Maximalwerte von Absunk und Rückströmungsgeschwindigkeit der Flachwasserfahrt in einem äquivalenten Gewässerquerschnitt dieser Breite.

Fahrdynamisches Einsinken (Squat): Schiffshydrodynamischer Effekt eines Schiffes in Fahrt. Das Binnenschiff fährt im Bereich des abgesenkten Wasserspiegels (\Rightarrow Wasserspiegelabsenkung) und sinkt deshalb gegenüber der Ruhelage ein (s. Bild 2.1). Zusätzlich führen lokale Spitzen der Umströmungsgeschwindigkeit aus Krümmungen der Schiffskontur und an den Schiffsantrieben zu Unterdrücken, die den Schiffskörper an Bug und Heck unterschiedlich stark an die Sohle ansaugen. Dadurch vergrößert oder verkleinert sich der Squat und das Schiff kann vertrimmen (\Rightarrow Vertrimmung).

Fetch: Üblicher englischer Begriff für \Rightarrow Windwirklänge.

Flachwasser: Tiefenmäßig beschränktes, seitlich unbeschränktes Fahrwasser; im Gegensatz zum \Rightarrow Tiefwasser wird die Wellenbewegung durch geringe Wassertiefe beeinflusst (\Rightarrow Wellenverformung). Die seitliche Wellenbewegung kann ungehindert abklingen (Situation in breiten, freifließenden Gewässern).

Hinsichtlich der Wellenform beginnt der Flachwassereinfluss bei einem Verhältnis Wellenlänge L zur mittleren Wassertiefe h_m von $L/h_m > 2$.

Hinsichtlich des Schiffswiderstandes beginnt der Flachwassereinfluss, wenn das Verhältnis von Wassertiefe zum Tiefgang des Schiffes $h/T \leq 4$ wird. Er ist sehr ausgeprägt bei $h/T \leq 2$ /Binek, Müller 1991/.

Fußsicherung: Unterer Abschluss einer Böschungssicherung.

Gewässerbett: Benetzte Umrandung eines Gewässers, bestehend aus Sohle und Böschung.

Gleitgeschwindigkeit: Schiffsgeschwindigkeit, bei der ein Schiff (Sportboot) ins Gleiten kommt und beginnt, auf seiner eigenen Bugwelle aufzufahren.

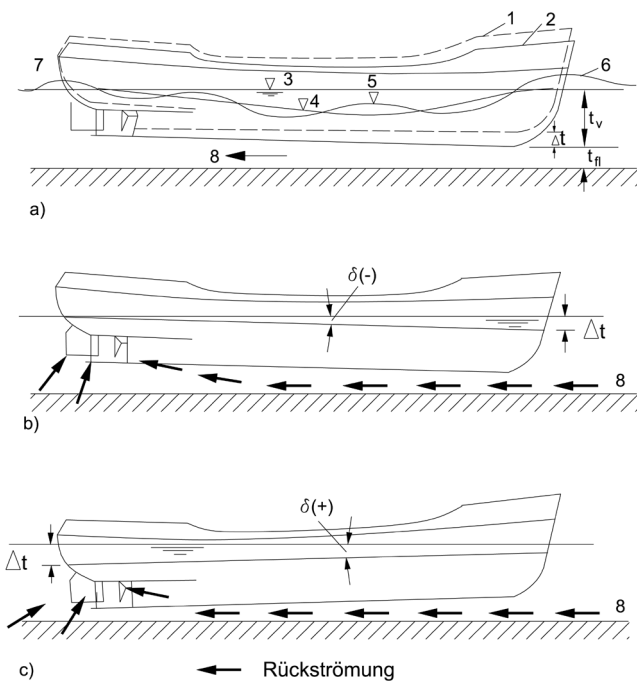


Bild 2.1 Wasserspiegelverformung in Fahrtrichtung, Squat und Richtung der Rückströmung (Vektorpfeil) bei einem herkömmlichen Binnenschiff mit völligem Bug, nach [Kuhn 1985]

(a) Absenkung und Schiffswellen

1 Schiff in Ruhe, 2 Schiff in Fahrt, 3 Ruhewasserspiegel, 4 abgesenkter Wasserspiegel (Primärwelle), 5 überlagerte Sekundärwelle, 6 Bugstau, 7 Heckwelle, 8 Rückströmung, Δt dynamische Einsinktiefe (Squat), t_n Flottwasser, t_v Tauchtiefe,

(b) $\delta(-)$ Trimmwinkel, buglastig

(c) $\delta(+)$ Trimmwinkel, hecklastig

(b) und (c) ohne Wasserspiegelverformung

Hauptpantquerschnitt, eingetaucher: Maximal eingetauchte Querschnittsfläche eines Schiffes (Schiffsbreite mal Abladetiefe) in Ruhe.

Heck(quer)wellen: Wellentyp, der sowohl vom Primär- als auch vom Sekundärwellensystem am Heck des Schiffes erzeugt wird und dessen \Rightarrow Wellenkamm senkrecht zur Fahrtrichtung des Schiffes steht. Heckquerwellen aus Primär- und Sekundärwellensystem können sich überlagern. Eine Sonderform ist der \Rightarrow Rollbrecher.

Kanalfall: Seitlich und tiefenmäßig begrenztes Fahrwasser (Tiefen- und Breitenbeschränkung); häufigste Situation auf Binnenwasserstraßen.

Der Einfluss der Breitenbeschränkung (Kanalfall) setzt ein, wenn das Verhältnis von Wasserspiegelbreite zur Schiffslänge $b_{WS}/L \leq 2 - 3$ wird [Schuster 1952].

Kanalbedingungen herrschen bei kleinen Querschnittsverhältnissen. Grob angenähert gilt für MS und GMS $n = A/A_M \leq 25 - 35$: der größere Wert gilt für

lange und schmale Schiffe mit geringem Tiefgang, der kleinere Wert für kurze und breite Schiffe mit großem Tiefgang.

Kursweg: Lage der tatsächlichen Fahrwegachse des Schiffes zur Gewässer-/Wasserstraßenachse.

Manövrierfahrt: Schifffahrt zum Manövrieren mit geringer Schiffsgeschwindigkeit $v_S \sim 0$, d. h. mit dem \Rightarrow Propellerfortschrittsgrad $J \sim 0$ und maximaler Propellerschubbelastung (Fälle: Anfahren, Stoppen, Wenden).

Normalfahrt: Schifffahrt mit auf freier Kanalstrecke gemäß BinSchStrO zugelassener oder mit technisch möglicher Schiffsgeschwindigkeit.

n-Verhältnis: \Rightarrow Querschnittsverhältnis

Porenwasserüberdruck: Der Porenwasserüberdruck ist der über den hydrostatischen Porenwasserdruck hinausgehende Wasserdruck in den Poren eines Erdstoffes, der durch behinderte Volumenzunahme des Porenwassers (bei Druckänderungen im Porenwasser) oder behinderte Volumenabnahme des Korngerüsts (bei Änderungen der totalen oder effektiven Spannung des Korngerüsts) entsteht. Er entsteht durch \Rightarrow schnellen Wasserspiegelabsenk. Im Untergrund herrscht dann noch ein höherer Druck als an der Grenzfläche Wasser - Boden.

Primärwelle (Primärwellensystem): Folge der Wechselwirkung zwischen Schiff und Wasserstraße; sie resultiert aus der Verdrängungsströmung um den Schiffskörper, zu der die Wasserspiegelabsenkungen beiderseits des Schiffes und die Stauwellen an Bug und Heck gehören. Sie ist eine mit dem Schiff fortschreitende, nach den Seiten hin abklingende Welle (s. Bild 2.2 und Bild 2.3).

Propellerfortschrittsgrad: Verhältnis $J = v_A/nD$ aus Anströmgeschwindigkeit des Propellers v_A zum Produkt von Drehzahl n und Propellerdurchmesser D .

Querschnittsverhältnis: Verhältnis $n = A/A_M$ der (rückströmungswirksamen) Querschnittsfläche A einer Wasserstraße bei einem bestimmten Wasserstand zur Querschnittsfläche A_M des eingetauchten Teils eines Schiffes; in angloamerikanischer Fachliteratur wird meist der Kehrwert des Querschnittsverhältnisses $k = 1/n$, der blockage coefficient, verwendet.

Querwellen: Anteil des \Rightarrow Sekundärwellensystems, bei dem die Wellenkämme senkrecht zur Fahrtrichtung des Schiffes orientiert sind.

Reflexion: Trifft eine Welle auf eine Grenzfläche (Wand, Buhne, Leitwerk, Steilufer u. ä.), so wird sie dort teilweise zurückgeworfen. Dies bewirkt Verluste an Wellenenergie. Meist ist die Höhe der reflektierten Welle geringer als die der einfallenden Welle. Einfallende und reflektierte Wellen überlagern sich.

Reflexionsbrecher (surging breaker): Ab einer \Rightarrow kritischen Wellensteilheit erfolgt Luftaufnahme. Die Frontsteilheit bleibt nicht erhalten, trotzdem kommt es nicht zum Überstürzen. Ein sehr ausgedehntes Was-

ser-Luft-Gemisch auf der Frontseite bewegt sich als schäumender Schwall die Uferböschung hinauf. Dieser Brechertyp tritt bei steilen Böschungen auf.

Refraktion: Richtungs- und Betragsänderung einer Wellenfront durch Sohlreibung infolge Wassertiefenänderung im Uferbereich. Betrifft ursprünglich uferparallel laufende Wellen, die so zum Ufer hin gebeugt werden, und bereits schräg laufende, schiffserzeugte Sekundärwellen. Eine Seite des \Rightarrow Wellenkamms befindet sich in geringerer Wassertiefe als die andere. Da bei Flachwasserwellen die Wellengeschwindigkeit mit der Wassertiefe abnimmt, läuft der ufernähere Wellenflügel langsamer als der uferferne. Der Wellenkamm erfährt insgesamt eine Krümmung. Die \Rightarrow Wellenhöhe nimmt durch die Refraktion ab. Refraktion tritt zusammen mit \Rightarrow Wellenaufsteilen auf.

Rollbrecher: Wenn die längs des Ufers laufenden \Rightarrow Heckquerwellen brechen, werden sie Rollbrecher genannt; sie sind besonders hoch im Bereich der kritischen Schiffsgeschwindigkeit.

Rückströmung: Strömung entgegen der Fahrtrichtung des Schiffes, verursacht durch die Verdrängungswirkung des Schiffes und den Absunk.

Schiffsgeschwindigkeit, kritische: Geschwindigkeit v_{krit} des Schiffes im Flachwasser bzw. bei der Kanalfahrt, bei der das vom Schiff verdrängte Wasser nicht mehr vollständig im strömenden Zustand entgegen der Fahrtrichtung nach hinten abgeführt werden kann. Es beginnt der Wechsel vom strömenden zum schießenden Fließzustand (Froude-Zahl im engsten Querschnitt neben dem Schiff gleich 1). v_{krit} kann von Verdrängern i. d. R. nicht überschritten werden. Der Versuch, schneller als mit v_{krit} zu fahren, z. B. durch Steigerung der Antriebsleistung, führt bei Verdrängern i. Allg. zu noch größeren Rückströmungsgeschwindigkeiten und Absunkwerten als bei v_{krit} , wobei die Schiffsgeschwindigkeit über Grund wieder kleiner wird oder/und das Schiff an die Sohle angesaugt wird.

Schiffswellen: Das fahrende Schiff erzeugt auf Grund schiffshydrodynamischer Effekte Wellen auf der Gewässeroberfläche.

Schrägwellen: Anteil des \Rightarrow Sekundärwellensystems, bei dem sich die Wellenkämme in einem spitzen Winkel zur Fahrtrichtung des Schiffes ausbreiten.

Schwallbrecher (spilling breaker): Ab einer \Rightarrow kritischen Wellensteilheit erfolgt Luftaufnahme am Wellenscheitel. Ausgehend von dort entwickelt sich ein Wasser-Luft-Gemisch (Gischt) auf der Frontseite. Die Welle durchläuft die gesamte Brandungszone mit annähernd gleicher Frontsteilheit. Diese Brecherform findet sich besonders bei flacher Böschungsneigung.

Schwall- und Sunkwellen: Durch betriebsbedingte plötzliche Abflussveränderungen entstehende Wasserspiegelschwankungen. Sie haben den Charakter von Einzelwellen im Flachwasser.

Sekundärwellen (Sekundärwellensystem): Das Sekundärwellensystem lässt sich hinsichtlich seiner

Entstehung auf den Idealfall zweier an Bug und Heck befindlicher, gemeinsam wandernder Druckpunkte zurückführen, die Elementarwellen aussenden. Es stellt im Gegensatz zum \Rightarrow Primärwellensystem eine sich vom Schiff ausbreitende Gleichgewichtsstörung dar, die aus \Rightarrow Schräg- und \Rightarrow Querwellen besteht (s. Bild 2.2 und Bild 2.3).

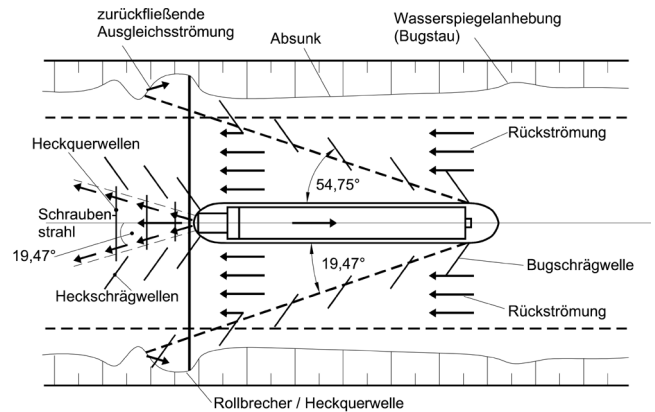


Bild 2.2 Wasserspiegelverformung in der Draufsicht: ungünstigste Überlagerung von Primär- und Sekundärwellensystem

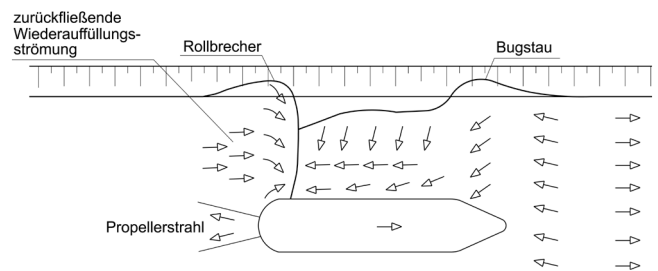


Bild 2.3 Wasserspiegelverformung in der Draufsicht: Primärwellensystem und Rollbrecher im kritischen Geschwindigkeitsbereich bei einem kurzen, ufernah fahrenden Schiff

Squat: \Rightarrow fahrdynamisches Einsinken

Standprobe: Der Propeller arbeitet mit dem Propellerfortschrittsgrad $J = 0$.

Standicherheit, globale: Die Sicherheit der wasserseitigen Böschung gegen Bruchzustände im Boden, bei denen die gekrümmte Gleitfläche des Bruchkörpers verhältnismäßig tief, d. h. unterhalb der \Rightarrow kritischen Tiefe (Bruchfuge) für die lokale Standicherheit, in den Boden einschneidet.

Standicherheit, lokale: Die Sicherheit gegen Bruchzustände im Boden der wasserseitigen Böschung, bei denen die Gleitfläche des Bruchkörpers verhältnismäßig oberflächennah, d. h. in der \Rightarrow kritischen Tiefe verläuft.

Sturzbrecher (plunging breaker): Bei flacher werdendem Wasser nimmt die Geschwindigkeit der ankommenden Welle in Bodennähe ab, gleichzeitig nimmt

die Steilheit der Wellenfront zu, ohne dass in dieser Phase eine bedeutende Luftaufnahme eintritt. Etwa bei senkrechter Lage der Wellenfront kommt es unter intensiver Luftaufnahme und -durchmischung zum Überstürzen der Wellenfront. Trifft die sich überstürzende Welle auf die Uferböschung, kommt es infolge der Kompressibilität der eingeschlossenen Luft zu einem Druckschlag auf die Uferböschung, wobei der Welle viel Energie entzogen wird. Dieser Brechertyp ist auf steileren Uferböschungen zu beobachten.

Tiefe, kritische: Die Tiefe einer böschungsparellen oberflächennahen Bruchfläche im anstehenden Boden, in der der Scherwiderstand, der durch \Rightarrow Porenwasserüberdruck infolge eines \Rightarrow schnellen Wasserspiegelabsinks reduziert wird, zu einem Minimum wird (\Rightarrow lokale Standsicherheit).

Tiefgangsverhältnis: Verhältnis Wassertiefe zu Tiefgang eines Schiffes h/T .

Tiefwasser: Die Wellenausbreitung kann ohne Tiefen- oder Breitenbeschränkung völlig ungehindert stattfinden bzw. abklingen; Situation in großen, tiefen Seen oder Meeren.

Vertrimmung (= dynamische V.): Zusätzliche Neigung der Schiffslängsachse gegen die Horizontale infolge fahrdynamischer Vorgänge (\Rightarrow fahrdynamisches Einsinken).

Vortrimmung (= statische Vertrimmung): Um bei der Fahrt in Gewässern mit beweglicher Sohle, z. B. in Flüssen, aus Sicherheitsgründen zu gewährleisten, dass das Schiff an Untiefen zuerst am Bug Sohlberührung bekommt und nicht am Heck, kann die Abladetiefe am Bug größer gewählt werden als am Heck.

Wasserspiegelabsunk: Durch Verdrängungsströmung bedingte Wasserspiegelabsenkung neben dem Schiff.

Die Fahrt des Schiffes bedingt ein spezielles Umströmungsbild, das mit Verformungen des Wasserspiegels einhergeht. Begriffe dazu sind auf Bild 2.1 (Längsschnitt) sowie Bild 2.2 und Bild 2.3 (Draufsichten) zu sehen.

Wasserspiegelabsunk, schneller: Wasserspiegelabsunk, bei dem die Absunkgeschwindigkeit größer als die Durchlässigkeit des Gewässerbetts ist.

Wassertiefe, mittlere: Rechnerische Tiefe eines Gewässers, die sich aus dem Quotienten Fließquerschnitt/Wasserspiegelbreite ergibt.

Wichtige gewässerhydraulische Begriffe sowie Abmessungen von Fahrwasser und -rinne, wie sie in der vorliegenden Schrift verwendet werden, sind in Bild 2.4 zusammengestellt.

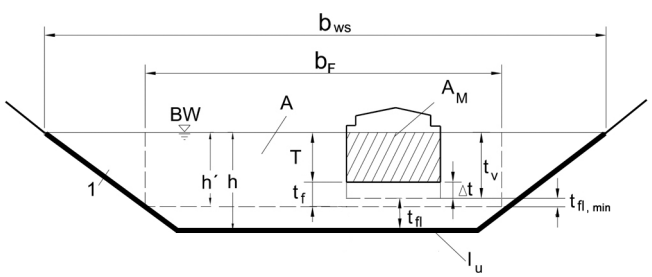


Bild 2.4 Abmessungen von Kanal und Fahrrinne, nach /Kuhn 1985/
 1 Kanalprofil bzw. bemessungsrelevantes Gewässerbett, b_F Fahrinnenbreite, b_{WS} Wasserspiegelbreite, h' Fahrinnentiefe, h Wassertiefe, T Tiefgang, Δt Einsinktiefe (Squat), t_v Tauchtiefe = $T + \Delta t$, t_f Kielfreiheit = $h' - T$, t_{fl} Flottwasser, $t_{fl,min}$ Mindestflottwasser, A Kanalquerschnitt, A_M eingetauchter Schiffsquerschnitt am Hauptspant, l_u benetzter Umfang (ohne Schiff), BW Betriebswasserstand

Wave shoaling: Üblicher englischer Begriff für \Rightarrow Wellenaufsteilen.

Welle, brechende: \Rightarrow Wellenbrechen

Wellenauflauf: Tritt auf, wenn eine gebrochene oder ungebrochene Welle noch eine gewisse Strecke die Uferböschung aufwärts läuft.

Wellenaufsteilen (wave shoaling): Im \Rightarrow Flachwasser hat die Welle ständig Grundberührung. Abnehmende Wassertiefe ruft - bei konstanter Periode - eine Reduzierung von Fortschrittsgeschwindigkeit und Wellenlänge sowie eine Zunahme der Wellenhöhe hervor. Wellenfront und -rücken werden steiler. Bei schräg auflaufenden Wellen tritt auch \Rightarrow Refraktion auf.

Wellenbrechen: Erreicht die \Rightarrow Wellensteilheit infolge \Rightarrow Wellenaufsteilen einen kritischen Grenzwert, so bricht die Welle. Der Vorgang ist mit der Bildung eines Wasser-Luft-Gemisches und mit dem Verlust von Wellenenergie verbunden (\Rightarrow Sturzbrecher).

Wellenhöhe: Bei regelmäßigen Wellen oder festgelegten Bemessungswellen ist als Wellenhöhe z. B. der vertikale Abstand zwischen direkt aufeinanderfolgendem Hoch- und Tiefpunkt einer Welle definiert. Zeitlich liegen diese Punkte eine halbe Wellenlänge/-periode auseinander. Bei natürlichen, unregelmäßigen Wellen können für die Ermittlung der Bemessungswellenhöhe statistische Verfahren angewendet werden.

Wellenkamm: Scheitellinie eines Wellenberges senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle.

Wellenlänge: Bei regelmäßigen Wellen oder festgelegten Bemessungswellen ist als Wellenlänge z. B. der horizontale Abstand zweier Wellenberge bzw. -täler definiert. Bei natürlichen, unregelmäßigen Wellen können statistische Verfahren angewandt werden.

Wellensteilheit: Verhältnis von \Rightarrow Wellenhöhe zu \Rightarrow Wellenlänge. Sie ist ein veränderlicher geometrischer Kennwert für Wellen.

Wellensteilheit, kritische: ⇒ Wellensteilheit, bei der die ankommende Welle bricht (⇒ Wellenbrechen).

Wellenüberlagerung: Treffen Wellen verschiedener Entstehungsart, Richtung oder Geschwindigkeit aufeinander, so überlagern sich ihre Höhen additiv, wenn die Wellenhöhen im Verhältnis zur Wassertiefe klein sind.

Wellenverformung: Können sich Wellen nicht ungehindert ausbreiten (z. B. infolge Wassertiefenänderung bei ⇒ Flachwasser, Gewässerberandung, Bauwerk, Anlaufwinkel u. ä.), so verändern sich die Wellenkämme und besonders die Wellenhöhen. Wesentliche Verformungsarten sind ⇒ Wellenaufsteilen, ⇒ Wellenbrechen, ⇒ Diffraktion, ⇒ Refraktion und ⇒ Reflexion.

Wiederauffüllungsströmung: Die Absunkmulde wird an einem geböschten Ufer beim Auftreten eines ⇒ Rollbrechers von achtern her wieder aufgefüllt.

Windstau: Wasserspiegelanhebung am windabgewandten Ende eines ⇒ Windwirkgebietes infolge der Schubspannung zwischen Luftströmung und Wasseroberfläche bei längerer konstanter Windeinwirkung.

Windwellen: Durch Windeinwirkung auf der Gewässeroberfläche entstehende Wellen.

Windwirkbreite: Breite des ⇒ Windwirkgebietes.

Windwirkgebiet: Bereich auf einer Gewässeroberfläche, der der Erzeugung von ⇒ Windwellen zur Verfügung steht. Die Längen- und Breitenbegrenzung durch Topographie (z. B. Ufer, Insel) und/oder meteorologische Bedingungen (z. B. Windrichtung) führen auf ein **effektives Windwirkgebiet**.

Windwirklänge: Längserstreckung des ⇒ Windwirkgebietes.

3 Übersicht der hydraulischen Belastungen des Gewässerbetts

3.1 Allgemeines

Sohle und Ufer unterliegen folgenden hydraulischen Einwirkungen, die sowohl einzeln als auch gleichzeitig auftreten können:

- Strömungen
- Wellen
- Wasserspiegelabsenk
- Grundwasserzustrom

Während Strömungen und Wellen eine Erosion des Gewässerbetts bewirken können, sind bei schnellem Wasserspiegelabsenk oder bei starkem Grundwasserzustrom Rutschungen bzw. Auflockerungen des Bodens (Hebungen) möglich.

Die Standsicherheit des Gewässerbetts ist gegenüber diesen hydraulischen Einwirkungen nachzuweisen, wenn Veränderungen eines Querschnitts nicht angenommen werden können. Ist sie nicht ausreichend, so sind Sicherungsmaßnahmen an den Ufern und/oder an der Sohle vorzusehen.

3.2 Strömungen

Für Wasserstraßen sind nur die **turbulenten** Strömungen von Bedeutung. Diese können je nach Korngröße des im Gewässerbett vorhandenen Materials zur Erosion führen. Stark turbulente Strömungen treten besonders auf

- im Unterwasser von Wehranlagen,
- im Schraubenstrahl von Schiffen und
- bei Rückströmung infolge Schifffahrt.

3.3 Wellen

3.3.1 Allgemeines

Wellen werden an Wasserstraßen durch Schifffahrt und durch starken Wind erzeugt. Sie können aber auch durch Wehr-, Schleusen- oder Kraftwerksbetrieb (Schwall/Sunk) hervorgerufen werden. Bei schiffserzeugten Wellen unterscheidet man zwischen dem Primärwellensystem, zu dem der Wasserspiegelabsenk gehört, der in Schiffsnähe auftritt und dessen Fortschrittsgeschwindigkeit der Schiffsgeschwindigkeit entspricht, und den Sekundärwellen, die sich weit vom Schiff fortbewegen können und sich dort wie freie Wellen verhalten. Diese freien Wellen werden nachfolgend in 3.3.2 und 3.3.3 behandelt. Das Primärwellensystem wird in 3.3.4 und 3.4 beschrieben.

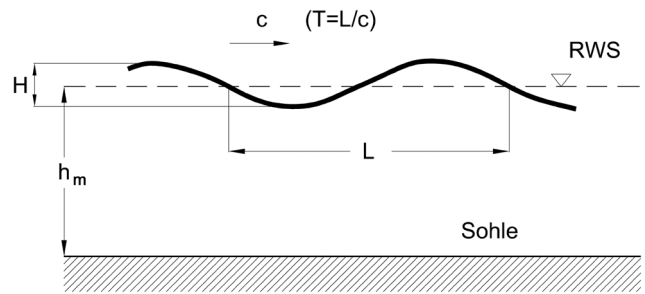


Bild 3.1 Charakteristische Größen einer sinusförmigen Wellenbewegung mit kleiner Wellenhöhe

Das Verhalten von freien Wellen und ihre Wirkungen auf das Gewässerbett sind unabhängig von der Entstehungsart der Wellen. Sie werden durch folgende charakteristische Größen gekennzeichnet (s. auch Bild 3.1):

- Wellenhöhe (H)
- Wellenlänge (L)
- Wellenfortschrittsgeschwindigkeit (c)
- Wellenperiode (T)
- Wassertiefe, mittlere (h_m)

Da das Verhalten einer Welle von einer bestimmten Wassertiefe an durch verschiedene Einflüsse (s. 5.8 Wellenverformung) verändert wird, ist es gebräuchlich, entsprechend dem Verhältnis mittlere Wassertiefe zu Wellenlänge h_m/L in Tief- und Flachwasserbereich zu unterteilen (s. Bild 3.2).

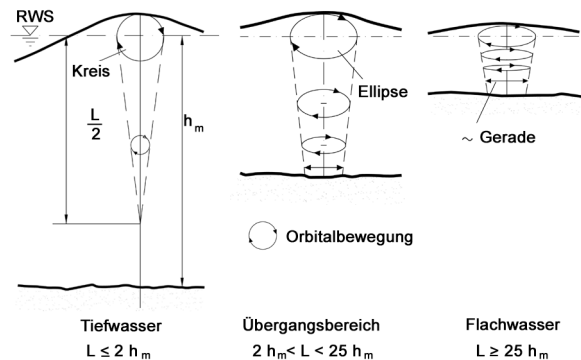


Bild 3.2 Wellenbereiche in Abhängigkeit von der mittleren Wassertiefe ($h_m = A/b_{WS}$) und Wellenlänge L

Im **Tiefwasser** hängt die Wellengeschwindigkeit c einer freien Welle, d. h. einer Welle, die nicht wie Primär- und Sekundärwellensystem an das Schiff gebunden ist, nur von der Wellenlänge ab:

$$c = \sqrt{\frac{Lg}{2\pi}} \tag{3-1}$$

mit

L Wellenlänge [m]

g Erdbeschleunigung [m/s²]

Im **Flachwasser** wird die Wellengeschwindigkeit einer freien Welle, auch als Stauwellengeschwindigkeit c_0 bezeichnet, nur noch von der mittleren Wassertiefe bestimmt:

$$c = c_0 = \sqrt{g h_m} = \sqrt{\frac{g A}{b_{ws}}} \quad (3-2)$$

mit

A Fließquerschnitt [m²]

b_{ws} Wasserspiegelbreite [m]

h_m mittlere Wassertiefe [m]

Im **Übergangsbereich** ist die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit freier Wellen von der Wassertiefe und der Wellenlänge abhängig:

$$c = \left(\frac{g L}{2 \pi} \tanh \frac{2 \pi h_m}{L} \right)^{1/2} \quad (3-3)$$

Bei schiffserzeugten Sekundärwellen ist die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit an die Schiffsgeschwindigkeit geknüpft (s. 5.5.5).

Für praktische Berechnungen genügt nach /Press, Schröder 1966/ i. d. R. folgende Unterscheidung:

Tiefwasser: $h_m / L \geq 0,5$

Flachwasser: $h_m / L < 0,5$

Danach sind schiffserzeugte Sekundärwellen i. d. R. als Tiefwasserwellen, die Primärwelle infolge Absunk als Flachwasserwelle zu betrachten.

3.3.2 Wirkung einer ungebrochenen auflaufenden Welle

Bei Durchgang einer ungebrochenen Welle treten an der Böschung unter dem Wasserspiegel schnelle hydrostatische Druckwechsel auf. Da der Porenwasserdruck im Untergrund diesen Druckwechseln nicht gleich schnell folgen kann (s. 3.4), ist je nach momentaner Lage der Wasseroberfläche der Porenwasserdruck im Boden größer als der äußere hydrostatische Druck (Zustand "Wellental") bzw. kleiner (Zustand "Wellenberg"). Hierdurch wird eine Strömung aus dem Untergrund heraus bzw. in ihn hinein ausgelöst.

Die aus dem Untergrund herausgerichtete Porenwasserströmung setzt die bereits durch den Auftrieb verminderte Gewichtskraft der Einzelkörner herab und führt gegebenenfalls zu einer Auflockerung des Bo-

dens. Bei gleichzeitigen Strömungseinwirkungen kann sie eine Erosion begünstigen.

Im **Übergangs- und Flachwasserbereich** kann die Orbitalbewegung einer Welle zur pendelnden Hin- und Herbewegung von Einzelkörnern und zu geringfügigen Umlagerungen auch von Deckwerkssteinen führen. Erst wenn die Strömungskräfte an der Sohle so groß werden, dass sie das in Bewegung versetzte Korn weiter verfrachten, tritt eine signifikante Erosion ein.

3.3.3 Wirkung einer brechenden auflaufenden Welle

Die brechende Welle wird hinsichtlich ihrer Form in drei verschiedene Brecherarten unterschieden /Pilarczyk 1990/: Schwall-, Sturz- und Reflexionsbrecher (s. 5.8.2)

Bei Wellen, die auf die Böschung auflaufen, hängt die Brecherform im Wesentlichen von der Neigung der Böschung ab, auf der die Welle bricht (s. Bild 5.42 und Tabelle 5.2).

Hinsichtlich der Beeinflussung der Stabilität des Ufers durch freie Wellen und Sekundärwellen des Schiffes ist vor allem der Sturzbrecher von Bedeutung.

Das stürzende Wasser sowie dadurch ausgelöste Auf- und Ablaufströmungen von Sturzbrechern wirken durch Strömungskraft und hohe Turbulenz sehr erosiv (Steinverlagerung) auf die betroffene Böschungszone (Wasserwechselbereich).

Der Sturzbrecher bewirkt im Wasserwechselbereich durch den Druckschlag im gesättigten Untergrund auch einen Porenwasserüberdruck, dessen Größe das Mehrfache der Wellendruckhöhe betragen kann. Seine Wirkung ist relativ gering, wenn die Welle in ein Wasserpolster oder in eine sehr hohlraumreiche Deckschicht (z. B. Steinschüttung) bricht. Gleichzeitig ist er mit einer stark turbulenten Auf- und Ablaufströmung verbunden.

Der Druckschlag reduziert die Standsicherheit einer Uferböschung dadurch, dass die durch ihn hervorgerufenen Porenwasserüberdrücke im Untergrund nicht schnell genug abklingen. Folgen mehrere Sturzbrecher nacheinander, kommt es zu einer Überlagerung der Porenwasserüberdrücke, wodurch die Scherfestigkeit des Bodens herabgesetzt wird.

3.3.4 Wirkung einer uferparallel laufenden brechenden Welle

Bei parallel zum Ufer laufenden Wellen, wie sie im Heckbereich von Schiffen auftreten, hängt die Brecherform hauptsächlich von der Wellensteilheit und der Froude-Zahl bzw. vom Verhältnis der Schiffsgeschwindigkeit zur kritischen Geschwindigkeit ab. Bei großen Wellensteilheiten und Froude-Zahlen bricht vor allem die Heckquerwelle (Rollbrecher). Zusam-

men mit der Wiederauffüllungsströmung können an der Wellenfront so große örtliche Strömungsgeschwindigkeiten entstehen, dass Deckwerkssteine aus dem Verband gelöst und umgelagert werden.

3.4 Wirkung des Wasserspiegelabsunks

3.4.1 Allgemeines

Der Wasserspiegel eines Gewässers kann sich durch natürliche oder künstliche Einflüsse langsam oder schnell ändern. Von Bedeutung ist dabei für die geotechnische Standsicherheit des Gewässerbetts (Uferböschungen, Sohle), ob das Porenwasser des anstehenden Bodens den Wasserspiegeländerungen des Gewässers ohne Entstehung nennenswerter Überdrücke folgen kann oder nicht.

Für das Entstehen eines Porenwasserüberdruckes kann als erster Anhalt und auf der sicheren Seite liegend der Vergleich der Absinkgeschwindigkeit des Wasserspiegels (v_{za}) mit der Wasserdurchlässigkeit des Bodens (k - Wert) herangezogen werden.

(a) langsam fallender Wasserspiegel: $v_{za} < k$

(b) schnell fallender Wasserspiegel: $v_{za} \geq k$

3.4.2 Langsam fallender Wasserspiegel

Der hydrostatische Porenwasserdruck im Boden des Gewässerbetts nimmt bei Absink des Wasserspiegels immer mit einer zeitlichen Verzögerung ab, weil Porenwasser nur ausfließen kann, wenn eine Druckdifferenz vorhanden ist.

Ist die Absinkgeschwindigkeit kleiner als die Durchlässigkeit des Bodens ($v_{za} < k$), dann ist der mögliche Gradient auch klein, und der Porenwasserdruck liegt nur geringfügig über dem des gerade wirksamen freien Wasserspiegels. Die damit verbundene Strömungskraft kann hinsichtlich der Standsicherheit der Uferböschungen und der Sohle vernachlässigt werden.

3.4.3 Schnell fallender Wasserspiegel

3.4.3.1 Allgemeines

Ein schnell fallender Wasserspiegel führt im Boden zu Porenwasserüberdrücken (s. 3.4.1). Er kann im Zusammenhang mit folgenden Ereignissen auftreten:

- a) großflächig
 - Absink aus Schifffahrt (je nach Abladetiefe und Gewässerquerschnitt)
 - Tide
 - ablaufende Hochwasserwelle (unmittelbar nach Überschreiten der Hochwasserspitze)
 - Staulegung (in der Anfangsphase)

- Schwall-/Sunkwelle infolge Wehr-, Schleusen- oder Kraftwerksbetriebs
- Dambruch

b) kleinflächig

- Bug- und Heckwellen fahrender Schiffe, insbesondere von schnell fahrenden Leertourern, Fahrgastschiffen und Sportbooten
- Windwellen

Die Größe der erzeugten Porenwasserüberdrücke ist unabhängig von der Ausdehnung der schnell absinkenden Wasserfläche.

3.4.3.2 Wirkung des Porenwasserüberdrucks

Fällt der Wasserspiegel eines Gewässers schneller, als sich der im Boden vorhandene hydrostatische Porenwasserdruck anpassen kann ($v_{za} \geq k$), so führt dies zu Porenwasserüberdrücken im Boden (vgl. Bild 3.4). Ursache des Porenwasserüberdrucks ist die Verzögerung des Druckausgleichs durch Gasbläschen, die sich mit der Abnahme des Drucks vergrößern /Köhler 1993; Köhler 1996/.

Durch den Porenwasserüberdruck werden Sickerströmungen in Richtung der Bodenoberfläche (s. Bild 3.3) ausgelöst. Die Sickerströmungen vermindern die Standsicherheit einer Böschung/Sohle und können zu Rutschungen bzw. zu einer Auflockerung des Bodens führen.

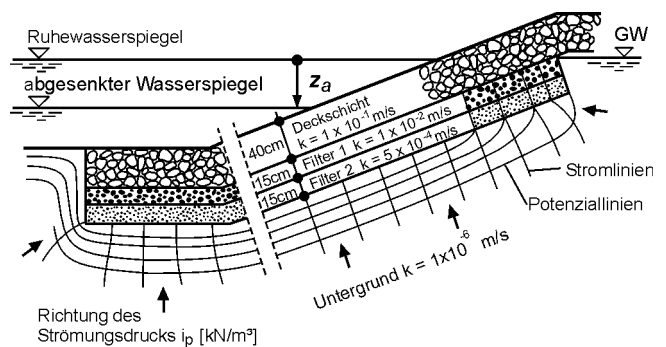


Bild 3.3 Strom- und Potenziallinien im Boden unter einer durchlässigen Böschungssicherung bei schnellem Wasserspiegelabsink

3.4.3.3 Größe und Verlauf des Porenwasserüberdrucks

Die Größe und der Verlauf des Porenwasserüberdrucks infolge eines schnellen Wasserspiegelabsunks werden im Wesentlichen vom Absink z_a und von der Absinkzeit t_a sowie von der Durchlässigkeit des Bodens k und der Kompressibilität des Wasser-

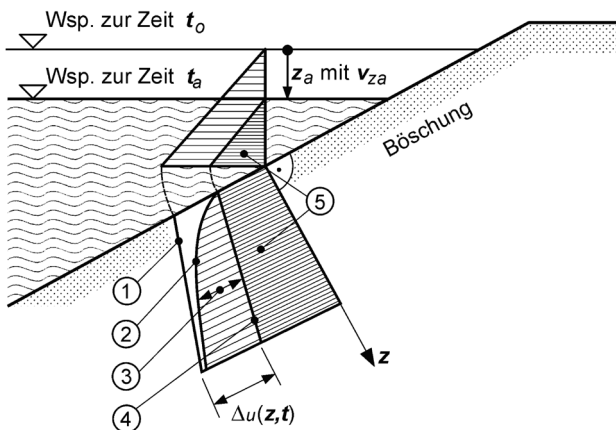
Boden-Gemisches (inkl. Gasanteil) in der oberflächennahen Zone des Gewässerbetts bestimmt. Die drei letztgenannten Einflussgrößen werden zusammen durch den Porenwasserdruckparameter b berücksichtigt (s. 5.10.3).

Der mit der Tiefe z exponentiell zunehmende Porenwasserüberdruck Δu besitzt bei Erreichen des Absinkmaximums seinen Höchstwert und klingt dann mit der Zeit wieder ab (s. Bild 3.4).

Durch den Porenwasserüberdruck können die effektiven Spannungen im Boden und damit die Reibungskräfte soweit reduziert werden, dass eine Uferböschung (mit oder ohne Deckwerk) in einer böschungsparellen Bruchfläche in der Tiefe d_{krit} abgleiten kann (Anhang A).

Ist ein Abgleiten nicht möglich (z. B. gestütztes oder aufgehängtes Deckwerk oder bei sehr flacher Böschungneigung bzw. an der Sohle), so können oberflächennahe Auflockerungen eintreten, die zu "hydrodynamischen Bodenverlagerungen" führen können.

Diese Grenzzustände im Boden können durch ein ausreichend schweres Deckwerk verhindert werden.



- Legende :
- ① Porenwasserdruck zur Zeit t_0
 - ② Porenwasserdruck zur Zeit t_a
 - ③ Porenwasserüberdruck Δu zur Zeit $t = t_a$
 - ④ Porenwasserdruck zur Zeit $t = t_\infty$
 - ⑤ Hydrostatischer Druckanteil für $t = t_a$
 - z_a Wasserspiegelabsenk
 - v_{za} Absinkgeschwindigkeit ($v_{za} = \frac{z_a}{t_a}$)
 - Δu Porenwasserüberdruck
 - z Tiefe im Boden senkrecht zur Böschung

Bild 3.4 Hydrostatischer Porenwasserdruck und Porenwasserüberdruck während eines schnellen Wasserspiegelabsinks

3.5 Grundwasserzustrom

Liegt der Grundwasserspiegel in der Böschung über dem Ruhewasserspiegel des Gewässers, z. B. bei einem Gewässer im Einschnitt oder nach dem Ablauf eines Hochwassers, so erfolgt ein Grundwasserzustrom zum Gewässer. Dadurch wirkt im Böschunguntergrund ein höherer hydrostatischer Wasserdruck und damit eine Strömungskraft in Richtung auf das Gewässer. Diese Einwirkungen sind bei allen geotechnischen Berechnungen zu berücksichtigen.

Bei Austritt des Grundwassers aus einer ungeschützten Böschung wird der Grenzzustand der lokalen Böschungstabilität erreicht bei einer Böschungneigung von

$$\beta \leq \varphi'/2 \tag{3-4}$$

mit

- β Böschungswinkel [°]
- φ' effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]

Ein länger dauernder Austritt von Grundwasser an der Oberfläche sollte daher in jedem Fall vermieden werden. Bei seltenem und nur kurzzeitigem Grundwasserströmungsausstritt ist bei Neigungen $\beta < \varphi'/2$ durch eine lückenlose Grasschicht ein ausreichender Schutz gegeben.

4 Sicherheits- und Bemessungskonzept

4.1 Allgemeines

Für die Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen erfolgt keine Lastfallunterscheidung nach */DIN 1054/*.

Für die geotechnischen Nachweise wird jeweils eine maßgebliche extreme Lastkonstellation ermittelt, deren Auftretenswahrscheinlichkeit sehr gering ist. Der jeweilige Nachweis gilt - soweit nicht explizit anders vermerkt - als erbracht, wenn unter der aufgeführten Einwirkungskombination der Grenzgleichgewichtszustand nachgewiesen werden kann. Lediglich beim Nachweis der globalen Standsicherheit (s. 7.4) wird ein höheres Sicherheitsniveau durch den Ansatz von Teilsicherheitsbeiwerten nach */DIN1054/* gefordert.

Für die hydraulischen Nachweise, mit denen eine Bemessung der erforderlichen Steingröße zur Gewährleistung ihrer Lagesicherheit bei Strömungs- und Wellenbeanspruchung durchgeführt wird, sind die Anforderungen an die Auftretenswahrscheinlichkeit der anzusetzenden Einwirkungen nicht so streng wie für die geotechnischen Nachweise, weil die Verlagerung von einzelnen Steinen - auch wenn sie mit der Zeit akkumulieren - weder die Standsicherheit des Deckwerks noch eines Kanalseitendamms gefährdet. Daher sollte der hydraulischen Bemessung eigentlich eine Kosten-Nutzen-Analyse zu Grunde gelegt werden, in der die Mehrkosten eines schwereren oder teilvergossenen Deckwerks dem Unterhaltungsaufwand gegenübergestellt werden, der für die Reparatur- und Nacharbeiten im Laufe der Standzeit an einem leichteren Deckwerk entsteht, und nicht der hier verfolgte Weg nach Belastungsgrenzwerten. Wesentliche Parameter für den Unterhaltungsaufwand wären dabei neben der Deckwerkskonstruktion vor allem das Verkehrsaufkommen und die Flottenstruktur: Je häufiger Schiffe verkehren, die eine große Belastung der Deckwerke erzeugen, um so mehr Steine werden aus dem Verband gerissen und bewegen sich zum Fuß der Böschung.

Eine solche Kosten-Nutzen-Analyse setzt aber eine umfassende und detaillierte Datenbasis über die Unterhaltungsaufwändungen für die unterschiedlichen Deckwerkskonstruktionen in Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens und der Flottenstruktur voraus. Diese Datenbasis liegt bislang noch nicht vor.

Um trotzdem zu einem ersten Bemessungsansatz zu kommen, wurden neben veröffentlichten Berechnungsansätzen und Messergebnissen zusätzlich die Analyse neuer Fahrversuche mit unterschiedlichen Schiffstypen */BAW 2004/* herangezogen, bei denen durch die Wellen- und Strömungsbelastungen deutliche Steinverlagerungen an neuen Deckwerken erzeugt und in ihrem Umfang quantifiziert werden konnten. In Zukunft sollten weitere systematische Dokumentationen von Unterhaltungsaufwändungen für Deckwerke durchgeführt werden, um so in Verbin-

dung mit Messergebnissen zu den Einwirkungen eine breitere und zuverlässigere Erfahrungsbasis für das Bemessungskonzept von Deckwerken zu gewinnen.

Das hier vorgestellte Bemessungskonzept umfasst folgende hydraulische Nachweise:

- Ermittlung der erforderlichen Steingröße bei Heckquerwellenbelastung ('Normalfahrt') nach 6.2
- Ermittlung der erforderlichen Steingröße bei Belastung durch Propulsionsströmung ('Manövrierfahrt') nach 6.3
- Ermittlung der erforderlichen Steingröße bei Belastung durch Sekundärwellen nach 6.4
- Ermittlung der erforderlichen Steingröße bei Windwellenbelastung nach 6.5
- Ermittlung der erforderlichen Steingröße bei kombinierter Schiffs- und Windwellenbelastung nach 6.6
- Ermittlung der erforderlichen Steingröße bei Strömungsangriff nach 6.7
- Ermittlung der sich aus der Steingröße gemäß der hydraulischen Bemessung ergebenden Mindestdicke der Deckschicht nach 6.9, ggf. modifiziert nach 6.10
- Einhaltung der Mindestdicken der Deckschicht nach 6.11
- Bestimmung der Länge der Deckschicht oberhalb und unterhalb des Ruhewasserspiegels gemäß 6.12

Für die zur Durchführung der hydrodynamischen Nachweise erforderlichen Bemessungsgrößen, z. B. die Höhe der Heckquerwelle oder die schraube-strahlinduzierte sohlennahe Strömungsgeschwindigkeit, können entweder Messdaten oder die in 5 angegebenen Formeln verwendet werden, wenn keine geeigneten Messdaten vorliegen, z. B. im Prognosefall.

Die erforderlichen geotechnischen Nachweise sind die folgenden:

- Ermittlung des Flächengewichts einer durchlässigen Deckschicht nach 7.2
- Ermittlung des Flächengewichts eines dichten Deckwerks gegen Abgleiten (7.3.2) und Abheben (7.3.3)
- Globale Standsicherheit der wasserseitigen Böschung einschließlich Deckwerk nach 7.4

Maßgebend ist die größte der sich aus den verschiedenen Nachweisen ergebende erforderliche Steingröße und Deckschichtdicke bzw. das größte Flächengewicht der Deckschicht.

4.2 Hydraulische Nachweise

Der Schwerpunkt der nachfolgend diskutierten Bemessungsverfahren betrifft Deckwerke aus unverklammerten Steinschüttungen. Aspekte zur Verwendung eines Teilvergusses sind in den Kapiteln 8 und 9 genannt.

4.2.1 Aspekte zur Festlegung der Bemessungsgröße

Die Bemessung der Böschungssicherungen erfolgt durch geeignet gewählte Grenzwerte der Bemessungsgrößen. Letztere werden vor allem durch das gewählte Bemessungsschiff, die Schiffsgeschwindigkeit, die Position des Schiffes im Querprofil und die Fahrsituation (Einzelfahrt, Begegnung, Überholen) bestimmt. Diese Kenngrößen sollten unter Beachtung ihrer Auftrittswahrscheinlichkeit und möglicher Schäden gewählt werden. Hierbei sind folgende Aspekte zu beachten:

- **Versagensrisiko:** Die Standsicherheit einer Uferböschung kann durch den Absink bei einer einzelnen Schiffspassage mit hoher Schiffsgeschwindigkeit gefährdet werden. Daher ist die größte realistische Schiffsgeschwindigkeit (kritische Schiffsgeschwindigkeit v_{krit} oder maximal zulässige Geschwindigkeit v_{zul}) für den Nachweis der globalen Standsicherheit einer Uferböschung anzusetzen. Wenn Einzelschäden wie z. B. Steinverlagerungen auftreten, die nicht zum Bauwerksversagen führen, sondern nur deren Summe (Dauerschädigung), kann ein typischer Größtwert der gewählten Schiffsgeschwindigkeit angesetzt werden. Im Regelfall wird in Analogie zum *MAR* empfohlen, von 97 % der kritischen Schiffsgeschwindigkeit auszugehen.
- **Flotte und Relationen:** Fahren überwiegend moderne, stark motorisierte Schiffe, die auf Grund ihrer Motorleistung v_{krit} erreichen können, oder/und gibt es Argumente dafür, dass die Fahrzeuge im betrachteten Kanalabschnitt besonders schnell fahren, sind höhere Bemessungsgeschwindigkeiten anzusetzen als bei überwiegend älteren, schwächer motorisierten Schiffen und Verbänden. Bei der Flottenzusammensetzung ist auch der Anteil an Sportbooten, an Schleppern und einzeln fahrenden Schubbooten sowie deren Motorisierung und Größe zu beachten. Die kritische Schiffsgeschwindigkeit ist bei diesen Schiffstypen nicht immer begrenzend für die erreichbare Schiffsgeschwindigkeit und damit die Wellenhöhen, sondern die Gleitgeschwindigkeit. Dabei ist zu prüfen, ob das Schiff diese Geschwindigkeit auf Grund der verfügbaren Motorleistung erreichen kann.
- **Verkehrsstärke:** Je größer das Verkehrsaufkommen ist, desto schneller akkumulieren sich Dauerschäden und desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass bemessungsrelevante große Schiffsgeschwindigkeiten, insbesondere bei Fahrt in Ufernähe, gewollt oder ungewollt, z. B. während eines Ausweichmanövers, erreicht werden. Deshalb können bei schwachem Verkehr geringere Bemessungsschiffsgeschwindigkeiten als bei starkem Verkehr angesetzt werden.
- **Größe der Kanalquerschnitte:** In engen Kanalquerschnitten, z. B. in solchen, die für Richtungsverkehr dimensioniert sind, haben die Schiffsführer nur einen kleinen Bereich zur Verfügung, in dem sie die Schiffsgeschwindigkeit mit Ausnahme der Manövrierfahrt variieren können (zwischen nautischer Mindestgeschwindigkeit und v_{krit}), um leicht und sicher zu fahren. Da in diesen Querschnitten auch schwächer motorisierte Fahrzeuge die kritische Schiffsgeschwindigkeit erreichen können, ist das Erreichen von v_{krit} wahrscheinlicher als in breiten Kanälen. Ggf. sind in engen Querschnitten auch überkritische Fahrzustände zu beachten, wenn Schiffe, die in der Kanalmitte mit v_{krit} fahren, zum Ufer hin ausweichen, denn die bei stationärer, ufernaher Fahrt erreichbare kritische Schiffsgeschwindigkeit ist kleiner als die bei zentrischer Fahrt. Bei breiten Kanälen ist dieser Belastungsfall weniger wahrscheinlich, da das Schiff bereits an Fahrt verliert, bis es das (fernere) Ufer erreicht.
- **Fahrsituation (Einzelfahrt, Begegnung, Überholen):** Beobachtungen zeigen, dass die größten Belastungen i. d. R. durch ufernah fahrende Schiffe verursacht werden. Dies gilt auch und besonders für breite Kanäle, in denen Begegnungen oder Überholvorgänge durchgeführt werden können, ohne die Schiffsgeschwindigkeit stark reduzieren zu müssen. Dort sind auch solche Fahrten bemessungsrelevant.
- **Zulässige Schiffsgeschwindigkeiten:** Auf den Kanalstrecken der BWStr gelten unterschiedliche zulässige Schiffsgeschwindigkeiten. Sie sind meist differenziert nach Voll- und Leerfahrern, wobei i. d. R. nur eine auf den Tiefgang bezogene Grenze angegeben ist. Verkehrsbeobachtungen zeigen, dass z. T. wesentlich größere Schiffsgeschwindigkeiten gewählt werden als zugelassen, wenn die Fahrzeuge diese erhöhten Geschwindigkeiten auf Grund der Motorleistung und der Querschnittsverhältnisse erreichen können. Umgekehrt kann es aber auch vorkommen, insbesondere bei modernen, abgeladenen Fahrzeugen, dass sie die zulässigen Schiffsgeschwindigkeiten auf Grund der kleinen n -Verhältnisse nicht immer erreichen können, d. h. die kritische Schiffsgeschwindigkeit ist begrenzend. Hierauf ist bei der Festlegung der Bemessungsgeschwindigkeit zu achten.

4.2.2 Empfehlungen für die hydraulische Bemessung

Relevante hydraulische Belastungen von Sohle und Ufer resultieren aus den im Folgenden beschriebenen Kenngrößen.

4.2.2.1 Primärwellenfeld

Es besteht aus folgenden Komponenten:

- **Wasserspiegelabsunk:** Er ist bei großen, voll abgeladenen Schiffen und Verbänden am größten und bestimmt folgende Größen:
 - Erforderliche Mindestdiefe des Deckwerks unter dem Ruhewasserspiegel (s. 6.12.3),
 - Flottwasser wegen des mit dem Absunk verbundenen fahrdynamischen Einsinkens der Schiffe in Fahrt; dadurch wird der Schraubenstrahlgriff auf die Sohle erhöht, wodurch die erforderlichen Steingrößen der Sohlensicherung bestimmt werden (s. 6.3),
 - Dauer, in der der Wasserspiegel fällt, und damit die Standsicherheit der Böschung; im Einzelfall ist zu untersuchen, ob eine kürzere Absunkdauer, die bei schnell fahrenden Schiffen im Bugbereich bei geringerem Absunk als beim Heck auftritt, zu ungünstigeren Bemessungsgrößen führt als eine längere Absunkdauer, die zwischen Bug und Heck auftritt und zu der ein größerer Heckabsunk gehört (s. 5.5.4.7).
- **Heckquerwelle:** Bei Annäherung an die kritische Schiffsgeschwindigkeit kann die Heckquerwelle (s. 5.5.4.4), insbesondere bei ufernaher Fahrt, bei der die Wellenlänge abnimmt bzw. die Wellensteilheit und damit die Wellenhöhe zunimmt, brechen und den Rollbrecher (mitlaufender Wechsellprung) ausbilden. Dieser ist i. d. R. für Steinverlagerungen an Uferdeckwerken verantwortlich. Große Heckquerwellenhöhen werden insbesondere in folgenden Situationen verursacht:
 - Bei exzentrischer, insbesondere ufernaher Fahrt,
 - bei Leerfahrern, die i. d. R. dynamisch hecklastig vertrimmen und Fahrzeugen, die hecklastig vorgetrimmt sind (Ballastfahrt),
 - bei einzeln fahrenden Schubbooten, Schleppern und Sportbooten, bei denen sich die am ggf. stumpfen Bug ausgelösten großen Schrägwellen mit der Heckquerwelle überlagern können (s. 5.5.5.1 Abstandsfall B und 5.5.5.2),
 - bei der Fahrt im Bereich der kritischen Schiffsgeschwindigkeit, bei der i. d. R. eine dynamische hecklastige Vertrimmung auftritt, die den Wasserspiegelabsunk und damit die Heckwelle erhöht (s. 5.5.4.4) und bei der zusätzliche Heckquerwellen auftreten können, die dem ge-

wellten Abflusszustand eines unvollkommenen Wechsellsprungs entsprechen (s. 5.5.5.3),

- bei für das Gleiten ausgelegten Sportbooten, die als Verdränger fahrend sich der Gleitgeschwindigkeit nähern, wobei sich die Querwellen des Bug- und Heckwellensystems überlagern (s. 5.5.5.1 Abstandsfall C und 5.5.5.4).

Die zugehörigen Druckgradienten und Strömungsgeschwindigkeiten aus der Orbitalbewegung und dem stürzenden Wasser der gebrochenen Welle, die auch auf der Uferböschung auftreten, bestimmen die erforderliche Steingröße (s. 6.2). Selbst dann, wenn die Wellen überwiegend uferparallel laufen, d. h. nur durch Refraktion eine geringe Auflaufendenz aufweisen, bestimmt die Höhe der Welle über dem Ruhewasserspiegel, die wegen der asymmetrischen Form dieser Wellen wesentlich größer ist als die Tiefe des Wellentals, auch die erforderliche Höhe der Ufersicherung (s. 5.8.6.2).

Bei stark vorgetrimmten Fahrzeugen kann der größte Wasserspiegelabsunk im Bugbereich und nicht im Heckbereich auftreten. Auch in dieser Fahrsituation kann es zum Brechen der Welle kommen. Dieser Sonderfall der Böschungsbeanspruchung wird hier nicht behandelt.

- **Wiederauffüllungsströmung:** In der Nähe der Uferböschung ist der Rollbrecher i. d. R. von einer böschungsparellen Strömung begleitet, die die Absunkmulde von achtern her auffüllt. Die Geschwindigkeit dieser Wiederauffüllungsströmung u_{\max} kann im Grenzfall die Schiffsgeschwindigkeit erreichen (s. 5.5.4.5). Dies ist dann der Fall, wenn die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit der Heckquerwelle auf Grund ihrer Eigendynamik bei großen Wellenhöhen so groß wird, dass sie droht, das Schiff zu überholen. Dies ist aber wegen der Bindung des Wellensystems ans Schiff nicht möglich, wodurch sie bricht. Dieser Effekt ist bei engen Kanalquerschnitten und ufernaher Fahrt im Bereich der kritischen Schiffsgeschwindigkeit am stärksten. Dieser Fall kann wegen der größeren möglichen Schiffsgeschwindigkeit von Leerfahrern oder Schleppern, trotz der Tatsache, dass das Verhältnis u_{\max} / v_S kleiner als bei voll abgeladenen Schiffen ist, dennoch bemessungsrelevant sein (s. 6.7.2).
- **Rückströmung:** Die mittlere Rückströmungsgeschwindigkeit steigt mit der Schiffsgeschwindigkeit, der Verdrängung des Fahrzeugs und mit dem Kehrwert der wirksamen Querschnittsfläche. Die örtliche sohl- bzw. böschungsnaher Rückströmungsgeschwindigkeit ist gegenüber dem Mittelwert erhöht, bei herkömmlichen Binnenschiffen insbesondere im Bereich der Schiffskimm am Bug oder allgemeiner an allen starken Krümmungen der Schiffskontur, wenn diese der Sohle oder dem Ufer nahe kommen. An diesen Stellen treten auch große örtliche Wasserspiegelabsenkungen auf, die

durch Einengung des Abflussquerschnitts die Rückströmungsgeschwindigkeit weiter vergrößern. Dies ist insbesondere im Bereich zwischen Schiffseitenwand und geböschtem Ufer bei ufernaher Fahrt der Fall (s. 5.5.4.4). Es ist zu prüfen, welcher der nachfolgend genannten Belastungsfälle die größten Rückströmungsgeschwindigkeiten ergibt:

- Ein zentrisch fahrendes, voll abgeladenes Schiff, wobei die dort tendenziell größere mögliche Schiffsgeschwindigkeit, zusammen mit der größeren Verdrängung, zu großen Rückströmungsgeschwindigkeiten führt,
- die ufernahe Fahrt eines voll abgeladenen Schiffes, wobei zwar die Schiffsgeschwindigkeit tendenziell reduziert ist, aber der Einengungseffekt zum Ufer hin zu einer Erhöhung führt,
- die schnelle Fahrt eines Leerfahrers in Ufernähe, wobei die größere Schiffsgeschwindigkeit, zusammen mit der stärkeren hecklastigen Vertrimmung solcher Fahrzeuge bedeutender sein kann als der geringere Verdrängungseffekt eines Leerfahrers gegenüber einem voll abgeladenen Schiff.

Der Einfluss eines exzentrischen Schiffspfades auf die Verteilung und damit die örtlichen Größtwerte der Rückströmungsgeschwindigkeiten ist im Vergleich zum Einfluss auf die Wellenhöhen gering.

Allgemein kann gesagt werden, dass der Rückströmungseinfluss in engen Kanälen, z. B. solchen für Richtungsverkehr, gegenüber dem Welleneinfluss hinsichtlich der erforderlichen Steingröße der Böschungssicherung an Bedeutung gewinnt. Für breite Kanäle ist i. d. R. die Höhe der Heckquerwelle bemessungsrelevant.

Grundlage der Ermittlung der vorher genannten hydraulischen Kenngrößen ist die eindimensionale Kanaltheorie (s. 5.5.3). Ihr liegen folgende wesentliche Vereinfachungen zu Grunde:

- Konstante Rückströmungsgeschwindigkeit über den Kanalquerschnitt,
- konstanter Wasserspiegelabsenk über die Schiffslänge,
- Wasserspiegelabsenk entspricht dem fahrdynamischen Einsinken (keine Vertrimmung),
- reibungsfreie Strömung.

Die eindimensionale Kanaltheorie liefert den Zusammenhang zwischen mittlerem Wasserspiegelabsenk, mittlerer Rückströmungsgeschwindigkeit und Schiffsgeschwindigkeit. Sie liefert auch einen Anhaltswert für die kritische Schiffsgeschwindigkeit.

Wegen der oben genannten Vereinfachungen werden Korrekturen zur Berücksichtigung folgender Einflüsse erforderlich:

- Flachwassersituation bei großen Kanalbreiten bzw. bei kurzen Schiffen im Vergleich zur Kanalbreite durch ein äquivalentes Kanalprofil und Näherungsformeln zur Veränderung der Wellenhöhe zwischen Schiff und Ufer (s. 5.5.1),
- Wasserspiegelneigung zwischen Bug und Heck sowie Schiffsförm zur Erhöhung der Durchschnittswerte des Absunks und der Rückströmungsgeschwindigkeit, um die Maximalwerte am schiffsnäheren Ufer abzuschätzen (s.5.5.4.2 - 5.5.4.4),
- exzentrische Fahrt durch ein kleineres äquivalentes Kanalprofil hinsichtlich der erreichbaren Schiffsgeschwindigkeit und der Mittelwerte von Absenk und Rückstrom,
- Schiffsförm und dynamische Vertrimmung durch Erhöhung der Mittelwerte der hydraulischen Kennwerte (s. 5.5.4.3 und 5.5.4.4),
- Geschwindigkeit der Wiederauffüllungsströmung in Abhängigkeit von Schiffsgeschwindigkeit und Wellenhöhe (s. 5.5.4.5).

4.2.2.2 Sekundärwellenfeld

Die an Diskontinuitäten und starken Krümmungen der Schiffskontur ausgelösten Wellen werden in auseinanderlaufende Schräg- und in Querwellen unterteilt. Sie entstehen vornehmlich an Bug und Heck und bilden entlang einer vom Schiff schräg nach hinten verlaufenden Linie Interferenzen, an denen die größten Wellenhöhen auftreten. Das Schrägwellensystem konzentriert sich auf einen schmalen Streifen entlang dieser Linie. Aus energetischen Gründen nimmt es mit der Potenz $-1/3$ mit dem Abstand vom Schiff ab. Querwellen nehmen schneller, d. h. mit der Potenz von $-1/2$ zum Ufer hin ab. Deshalb liefert bei uferferner Fahrt das Schrägwellensystem i. d. R. die größten Wellenhöhen am Ufer, bei ufernaher Fahrt das Querwellensystem (s. 5.5.5).

Bemessungsrelevant ist i. d. R. der Fall, wenn das Schiff in einem solchen Abstand zum Ufer fährt, bei dem infolge Interferenzen genau am Ufer lokal größere Wellenhöhen als bei allen anderen Abständen auftreten. Deshalb muss, trotz der Tatsache, dass die Abnahme der Wellenhöhen dort noch am geringsten ist, nicht zwangsläufig die ufer nächste Fahrt die größten Wellenhöhen ergeben. Dies ist im Einzelfall zu prüfen (s. 5.5.5.1).

Das Sekundärwellensystem bestimmt

- den Wellenaufbau und damit die erforderliche größte Höhe der Böschungsbefestigung (s. 6.12.2), wobei die größten Wellen von schnellen Fahrzeugen mit stumpfer Bugform ausgelöst werden, von einzeln fahrenden, stark motorisierten Schubbooten, Schleppern oder Sportbooten und
- die Steingröße, die erforderlich ist, damit Erosion durch Wellenschlag vermieden wird (s. 6.4).

Weiterhin können sich die am Bug ausgelösten Sekundärwellen kurzer Schiffe am Ufer mit den Heckquerwellen überlagern (s. Fall B in 5.5.5.1). Große Heckwellen werden von Sportbooten, die für große Schiffsgeschwindigkeiten und damit für das Gleiten ausgelegt sind, beim Erreichen der Gleitgeschwindigkeit ausgelöst. Sie sind bei tiefgehenden, langen Sportbooten am größten (s. 5.5.5.2 und 5.5.5.4). Es ist im Einzelfall zu prüfen, ob diese Wellen der Bemessung zu Grunde gelegt werden oder ob nicht Geschwindigkeitsbeschränkungen ausgesprochen und wirksame Geschwindigkeitskontrollen durchgeführt werden. Die hier angebotenen Gleichungen für die Wellenhöhen können auch zur Abschätzung zulässiger Schiffsgeschwindigkeiten genutzt werden, damit möglichst keine wellenbedingten Schäden entstehen.

4.2.2.3 Schraubenstrahl

Das erforderliche Steingewicht einer Sohlensicherung und im Sonderfall auch der Uferböschung wird durch die Größe der propulsionsbedingten Strömungsgeschwindigkeiten bestimmt (s. 6.3). Die sohnahen Strömungsgeschwindigkeiten sind am größten

- bei Schiffsschrauben mit großen Durchmessern und großen Konstruktionssteigungsverhältnissen,
- bei Schiffsschrauben mit großen Drehzahlen bzw. großem Leistungseinsatz,
- bei nicht ummantelten Propellern mit nachgeordnetem Zentralruder wegen der drallbedingten Strahlteilung,
- bei beschränkter Strahlausbreitung, z. B. in der Nähe einer Kaimauer und
- bei geringen Flottwassertiefen (s. 5.6.3).

Im Regelfall ist der maßgebende Belastungsfall ein auf der Stelle verharrendes oder anfahrendes Schiff, das z. B. bei einem Ablegemanöver die installierte Motorleistung vollständig einsetzt. Schiffe in Fahrt erzeugen geringere Belastungen.

Zu einer relevanten Belastung der Ufer aus dem Hauptantrieb von Schiffen kommt es z. B. bei Ablegemanövern wenn der Propellerstrahl durch das Hauptruder auf die Böschung gelenkt wird. Auch bei Wendemanövern kann eine starke Uferbelastung aus dem Hauptantrieb auftreten.

Der auf die Böschung gerichtete Strahl von aktiven Bugarudernanlagen bei Ablegemanövern kann zu großen Schäden an unverklammerten Deckwerken durch lokale Auskolkungen führen (s. 5.6.5 und 6.3.2). Eine Bemessung der Deckwerke, die der Belastung von Bugstrahlrudern standhält, kann u. U. zu einer Überbemessung im Vergleich zu einer Bemessung ausschließlich für die sonstigen Beanspruchungen führen. Es ist zu prüfen, ob solche Schäden im Rahmen der Unterhaltungen zu beseitigen oder ob die Deckwerke in solchen Bereichen zu verklammern sind.

4.2.2.4 Windwellen

Bei breiten Kanälen und wenn die Fahrrinne weit vom Ufer entfernt ist, können winderzeugte Wellen im Vergleich zu denen infolge Schifffahrt bemessungsrelevant werden (s. 5.7, 5.8 und 6.5). Deshalb werden die zugehörigen Gleichungen hier behandelt. Häufig ist es auch wichtig, die Größe der winderzeugten Wellen im Vergleich zu denen aus der Schifffahrt aufzuzeigen.

4.2.2.5 Empfehlungen für die hydraulische Bemessung im Regelfall

Unter Beachtung der heutigen Flotte (Stand 2003) auf deutschen Binnenwasserstraßen sowie der Erfahrung mit ausgeführten Deckwerken führt die Bemessung gegen folgende Schifffahrtsbeanspruchungen zu einer ausreichenden Erosions- und Standsicherheit von Uferböschungen, wobei ein gewisses Mindestmaß an Unterhaltungsaufwand in Kauf genommen wird:

- Ufernahe Einzelfahrten (Fahrten über Böschungsfuß oder Fahrrinnenrand abzüglich Sicherheitsabstand) von
- beladenen GMS (Rückströmung, Rollbrecher und Wiederauffüllungsströmung bestimmen Steingröße; Absunk und Absunkzeit definieren die Deckwerksdicke und die erforderliche Tiefe der Befestigung unter dem Ruhewasserspiegel) und
- unbeladenen oder hecklastig ballastierten GMS (Rollbrecher und Wiederauffüllungsströmung an der Böschung bestimmen die Steingröße, Sekundärwellenhöhen die erforderliche Höhe der Uferbefestigung über dem Ruhewasserspiegel) sowie
- solchen GMS, die auf Grund ihrer Motorisierung die kritische Schiffsgeschwindigkeit erreichen können.

Bei Schraubenstrahlbelastung wird die Erosionssicherheit von Sohldeckwerken und Uferböschungen bei geringer Flottwassertiefe durch ein anfahrendes, d. h. in der maßgebenden Belastungssituation nur kurzzeitig an der Stelle verharrendes, stark motorisiertes Fahrzeug mit großem Schraubendurchmesser bestimmt. Böschungsbelastungen durch Bugstrahlruder sind im Bereich von Liegestellen zu beachten. Durch Verklammerung können die Schäden minimiert werden.

Deckwerksbelastungen und Wellenaufbauhöhen aus schiffserzeugten Wellen durch einzeln fahrende Schubboote und Sportboote sind insbesondere dann zu berücksichtigen, wenn sie häufig auftreten oder durch flankierende Maßnahmen, z. B. Geschwindigkeitsbeschränkungen, nicht wirksam begrenzt werden können.

Alle weiteren Schäden sind im Rahmen der Unterhaltungen aufzufangen.

4.3 Geotechnische Nachweise

Die geotechnischen Nachweise dienen der Ermittlung des Flächengewichts von Deckwerk bzw. Deckschicht.

- Als Bemessungswert für den Wasserstand muss die für den jeweiligen Nachweis ungünstigste Kombination aus Böschungsgeometrie und Wasserstand gefunden werden. Bei gleichbleibender Geometrie ist in Kanälen für den Nachweis nach 7.2 der obere Betriebswasserstand BW_o (ergibt größte Böschungslänge unter Wasser L_u), für alle anderen Fälle die größte Potenzialdifferenz zwischen Grundwasser- und Kanalwasserspiegel maßgebend.
- Eine unplanmäßige Entleerung eines Kanals durch einen Schadensfall braucht bei der Bemessung der Böschungssicherung nicht berücksichtigt zu werden. Schäden auf benachbarte Bebauung infolge des Versagens der Böschungssicherung sind jedoch auszuschließen.
- Wird ein Kanalabschnitt planmäßig entleert, so kann die Böschungssicherung auf die dann auftretende Einwirkungskombination bemessen werden. Dabei können konstruktive Maßnahmen (z. B. Wasserhaltung) berücksichtigt werden.
- Strömungseinwirkungen werden bei der geotechnischen Bemessung nicht berücksichtigt.
- Der Wasserspiegelabsink aus Windstau ist in Kanälen durch den Wasserstand BW_u berücksichtigt.
- Für einen Wasserspiegelabsink aus Tideschwankungen, Schleusung oder anderen relativ langsam verlaufenden Wasserspiegeländerungen ist im Bereich der Böschung der maximal auftretende Unterschied zwischen abgesenkter Wasserspiegellage und Grundwasserstand anzusetzen.
- Als Wasserspiegelabsink infolge einer Schiffs vorbeifahrt ist der maximal mögliche Absink über dem Böschungsfuß bei der gewählten Bemessungsschiffsgeschwindigkeit anzusetzen, sofern die Randbedingungen für die Schifffahrt das Erreichen dieser Geschwindigkeit ermöglichen.
- Als Rechenwert für den Wasserspiegelabsink infolge von reinen Windwellen ist ein Viertel der zugehörigen Wellenhöhe als stationärer Zustand in die Berechnung einzuführen.
- Sekundärwellen, die bei einem Schiffsabsink auftreten, müssen nicht berücksichtigt werden.
- Als Rechenwert für den schnellen Wasserspiegelabsink infolge von langen Wellen, z. B. Sunkwellen (Wellenlänge $L > 20$ m), ist die Hälfte der Wellenhöhe H als stationärer Zustand in die Berechnung einzuführen.

- Für die Absunkgeschwindigkeit und die Absunkdauer von Windwellen oder Sekundärwellen der Schiffe sind folgende Formeln anzusetzen:

$$v_{za} = \pi H/T \quad (4-1)$$

$$t_a = T/2 \quad (4-2)$$

mit

H Wellenhöhe [m]

t_a Absunkdauer [s]

T Wellenperiode [s]

- Als Bemessungswert des Grundwasserstandes ist der maximal mögliche Grundwasserstand (z. B. aus langjährigen Messungen) anzusetzen. Ist die Erfahrungsbasis zu gering, ist ein im Einzelfall festzulegender Sicherheitszuschlag zu addieren.
- Verkehrslasten sind pauschal als Flächenlast von 10 kN/m^2 ab der Böschungsschulter zu berücksichtigen. Ist eine Laststellung unmittelbar an der Böschungsschulter durch konstruktive Maßnahmen ausgeschlossen, ist die dann ungünstigste mögliche Laststellung anzusetzen. Größere Lasten z. B. Schwerlasten sind gesondert nachzuweisen.
- Bauzustände sind nur dann zu berücksichtigen, wenn sie zu noch ungünstigeren Einwirkungskombinationen führen.

Als Rechenwerte für die Bodenwiderstände sind charakteristische Werte ohne Beaufschlagung durch einen Teilsicherheitsbeiwert einzusetzen, da ein Grenzstand mit einer ausreichend geringen Auftretenswahrscheinlichkeit betrachtet wird. Abweichend davon sind allerdings beim Nachweis der globalen Standicherheit nach *DIN 4084*/ Teilsicherheitsbeiwerte nach *DIN 1054*/ anzusetzen. Nach *DIN 4020*/ ist der charakteristische Wert "auf der sicheren Seite" vom Mittelwert zu wählen. Der Abstand gegenüber dem Mittelwert kann bei ausreichender Datenbasis klein, muss aber bei mangelhafter Datenbasis groß angenommen werden.

Für die Scherfestigkeit von Deckschichten darf ohne weiteren Nachweis ein innerer Reibungswinkel für lose Schüttsteine der Klassen II bis IV nach *TLW*/, Stand 1997, bzw. der Klassen $CP_{90/250}$, $LMB_{5/40}$, $LMB_{10/60}$ bis $LMB_{40/200}$ nach *TLW*/, Stand 2003, von $\varphi_D' = 55^\circ$ (Kohäsion $c' = 0$) und für teilvergossene Deckschichten von $\varphi_D' = 70^\circ$ ($c' = 0$) angesetzt werden.

5 Ermittlung der hydraulischen Einwirkungen

Die nachfolgend in Kap. 5 vorgestellten Verfahren werden nicht benötigt, wenn für die zur Ermittlung der Steingröße und der Deckwerksdicke notwendigen hydraulischen Kennwerte aus Messdaten für alle relevanten Bemessungssituationen bekannt sind. Messdaten sind berechneten Werten vorzuziehen, denn letztere unterliegen folgenden Beschränkungen:

- (1) Sie resultieren i. d. R. aus Berechnungsverfahren, denen Annahmen über die maßgebenden physikalischen Prozesse zu Grunde liegen, die mit vereinfachten Grundgleichungen arbeiten und bei denen die Randgeometrie vereinfacht wird (z. B. wird das Strömungsfeld um ein fahrendes Schiff im äquivalenten Kanalprofil als eindimensional approximiert).
- (2) Notwendige empirische Korrekturen der mit den Vereinfachungen gewonnenen Bemessungsansätze, mit denen z. B. das Aufsteilen der Wellenhöhen bei ufernaher Fahrt berücksichtigt wird, gelten nur für den Bereich der zu Grunde liegenden Messdaten.
- (3) Nicht für alle hier angegebenen Verfahren liegen Erfahrungen über die Anwendbarkeit für relevante Bemessungsfälle vor (z. B. für die Wellenhöhen von Sportbooten).

Deswegen werden nachfolgend zum Teil mehrere Berechnungsverfahren angeboten, die gleich plausibel erscheinen, oder mit denen unterschiedliche Bemessungsaspekte beleuchtet werden können, z. B. der Einfluss der Böschungneigung oder der Wellensteilheit auf die Stabilität des einzelnen Deckwerksteines. Es ist der Verantwortung des Projektgenieurs überlassen, aus dem Vergleich der Berechnungsergebnisse aus gleich wahrscheinlichen Verfahren die maßgebende Bemessungsgröße auszuwählen.

Zur Genauigkeit der Berechnungsverfahren ist anzumerken, dass die aus dem Primärwellenfeld resultierenden Belastungen genauer ermittelt werden können als die aus dem Sekundärwellenfeld, aus der Wiederauffüllungsströmung und aus den Windwellen. Eine besondere Schwierigkeit bereitet die Ermittlung der Belastung aus den Propulsionsorganen der Schiffe, da diese besonders stark von der Schiffskonstruktion abhängig sind und nicht alle Sonderfälle behandelt werden können.

5.1 Allgemeines

Für die Bemessung von Deckschichten in den nachfolgenden Kapiteln 6 und 7 gegen die möglichen hydraulischen Einwirkungen auf das Gewässerbett werden folgende Bemessungsparameter benötigt:

- a) für die hydraulische Bemessung (Kap. 6)
 - maximale Wellenhöhe
 - maximale Strömungsgeschwindigkeit
- b) für die geotechnische Bemessung (Kap. 7)
 - maximaler schneller Wasserspiegelabsunk oder Porenwasserüberdruck im Boden
 - maximale Absunkgeschwindigkeit

Die Größe dieser Parameter kann entweder durch Messungen oder auch rechnerisch bestimmt werden.

Nachfolgend werden Rechenverfahren und Hinweise für die Ermittlung der Größen folgender hydraulischer Einwirkungen und ihrer Reaktionsgrößen im Boden angegeben:

- Wellenhöhe (Wind, Schifffahrt)
- Rückströmung der Schiffe
- Schraubenstrahl von Schiffen
- schneller Wasserspiegelabsunk durch Schifffahrt
- schneller Wasserspiegelabsunk infolge Wehr-, Schleusen- oder Kraftwerksbetriebes
- schneller Wasserspiegelabsunk in Verbindung mit dem Ablauf einer Hochwasserwelle
- Größe des Porenwasserüberdrucks im Boden bei schnellem Wasserspiegelabsunk

Außerdem werden für die Bemessung bestimmte Eingangparameter der Wasserstraße und der Schifffahrt sowie meteorologische Eingangparameter benötigt, für deren Ermittlung nachfolgend ebenfalls Hinweise gegeben werden.

5.2 Daten zur Wasserstraße

5.2.1 Gewässergeometrie

Die Geometrie des Gewässers oder des Kanals beeinflusst sowohl natürliche als auch schifffahrtsbedingte hydraulische Einwirkungen. Daher müssen für die Standsicherheitsnachweise Abmessungen, Ausbildung und Verlauf der Wasserstraße im betrachteten Abschnitt bekannt sein.

Bei den Flüssen müssen **Ist-Profile** verwendet werden. Für Kanalquerschnitte gelten die 'Richtlinien für Regelquerschnitte von Schifffahrtskanälen' /BMV 1994/.

5.2.2 Fahrrinnengeometrie

Mindestwerte für **Fahrrinnenbreiten** sind den 'Richtlinien für Regelquerschnitte von Schifffahrtskanälen' /BMV 1994/ zu entnehmen.

Die **Fahrrinntiefe** ist von der Wasserstraßenklasse abhängig, die in der CEMT-Klassifizierung der europäischen Binnenwasserstraßen /BMV 1996/ angegeben ist.

Für die Ermittlung der schiffahrtserzeugten hydraulischen Einwirkungen auf das Gewässerbett muss die Fahrinne festliegen und müssen die Positionen des Bemessungsschiffes sinnvoll gewählt werden.

5.3 Daten zum Schiff

Wichtige Eingangswerte für die Ermittlung der hydraulischen Einwirkungen auf das Gewässerbett sind Länge, Breite und Tiefgang sowie installierte Maschinenleistung und Schraubendurchmesser des Bemessungsschiffes. Gültige Obergrenzen für die gängigen Wasserstraßenklassen sind in */BMV 1996/* angegeben. Angaben für Küstenmotorschiffe, Schubleichter und Schubverbände sind in der */EAU 1996/* enthalten. Werte für Großmotorgüterschiffe (GMS) bietet Bild 5.1.

Bei der Festlegung der Schiffsabmessungen ist darauf zu achten, welche Arten von Schubverbänden im untersuchten Bereich verkehren. Es können auch GMS als Koppelverbände vorkommen.

Bezeichnung	Länge	Breite	Mittel des Tiefgangs (max.)	Wasserverdrängung	Tragfähigkeit	ungefähre Nennleistung
	L	B	T	V	T	$P_{d,Nenn}$
Symbol						
Einheit	m	m	m	m ³	t	kW
MS Johann Welker	80	9,5	2,5	1620	1290	550
GMS Knickspantform	110	11,4	3,7 ¹⁾	4060	3100	1200

Bild 5.1 Beispiele für häufige Gütermotorschiffe, nach */Kuhn 1985/*; ¹⁾ im westdeutschen Kanalnetz nur 2,8 m zugelassen

Während bei Normalfahrt der Schraubenstrahl für die Böschungs- und Sohlensicherungen keine maßgebende Einwirkung darstellt, können sie bei Manövrierfahrt (z. B. An-, Ablegen, Wenden usw.) durch den Schraubenstrahl des Hauptantriebs bzw. durch Bugstrahlruder beschädigt werden. Für die Bemessung auf diese Einwirkung müssen Propellerdurchmesser, Propellerdrehzahl, Propelleranzahl und Schubbelastungsgrad des Propellers/Bugstrahlruders oder der Propellerdurchmesser und die Antriebsleistung der zu berücksichtigenden Schiffstypen bekannt sein; Anhaltswerte sind in Tabelle 5.1 enthalten.

Schiffstyp	Länge/ Breite/ max. Tiefgang $L/B/T$ [m/m/m]	Propeller- durch- messer D [m]	ungefähre Nenn- leistung $P_{d,Nenn}$ [kW]	Nenn- drehzahl des Propellers n_{Nenn} [1/min]	
Gütermotorschiffe					
GMS Großes Rhein- schiff	95-110/ 11,4/ 2,5-2,8	1,70	1200	310 - 400	
Europa- schiff (Johann Welker)	80-85/ 9,5/ 2,5	1,70	550	250 - 310	
Gustav Koenigs	67-80/ 8,2/ 2,5	1,50	375	270 - 340	
Kempen- aar	50-55/ 6,6/ 2,5	1,30	≈ 200	290 - 370	
Peniche	38,5/ 5,05/ 1,8-2,2	1,10	150	330 - 420	
Schubboote und Schlepper					
Klein- schubboot 1 bzw 2 Propeller	Im Detail vom Hersteller bzw. Reederei zu erfragen	1,50	375 bzw 750	270 - 340	
Strecken- schubboot klein 2 Propeller		1,70	750-1500	280 - 350	
Strecken- schubboot groß 2 Propeller 3 Propeller		1,85	2 x 750 = 1500 3 x 875 = 2625	240 - 300 250 - 320	
Groß- schubboot (Nieder- rhein) 2 Propeller 3 Propeller		2,10	2 x 1313 = 2625 3 x 1500 = 4500	240 - 300 250 - 310	
Schlepper		31/5/2,20	1,50	290	-
Leichter					
Europa II	76,5/ 11,4/ 2,5				
Europa I	70/ 9,5/ 2,5				
Bugstrahlruder					
Schiffstyp	installierte Leistung P_{Bug} [kW]	Propellerdurchmesser D [m]			
GMS, Leichter	150-200	1,10			
Europa- schiff	≈150	0,80			

Tabelle 5.1 Technische Daten von heutigen Binnenfahrzeugen (Anhaltswerte; für zukünftige Binnenschiffe sind Daten zu erfragen)

Soweit für das Bemessungsschiff keine genaueren Werte vorliegen, können für Binnenschiffe Propellerdrehzahlen zwischen $n = 300$ [1/min] (große Propellerdurchmesser) und $n = 500$ [1/min] (kleine Propellerdurchmesser) angenommen werden. Für Schubschiffe müssen die zutreffenden Werte erfragt werden. Die in Tabelle 5.1 angegebenen Nenndrehzahlen sind Näherungswerte und können in Einzelfällen um 20 % überschritten werden. Die unteren Grenzwerte gelten für Düsenpropeller.

Bugstrahlruder sind i. d. R. mit dem Schiffsboden bündig eingebaut. Weiter sind Sonderformen zu beachten wie Pumpjets. Der Strahl tritt dabei mit einer Geschwindigkeit von bis zu 14 m/s aus und trifft in einem Winkel von 8° - 17° auf die Sohle.

5.4 Schifffahrtsbedingte hydraulische Einwirkungen

5.4.1 Komponenten

Die schifffahrtsbedingten hydraulischen Einwirkungen auf das Gewässerbett entstehen durch

- Wasserspiegelabsenk,
- Schiffswellen (Primär- und Sekundärwellensystem),
- Rückströmung (Verdrängungsströmung) und
- Schraubenstrahl (Propulsionsströmung).

Den einzelnen Faktoren, die im Regelfall stets gleichzeitig wirken, kommt in Abhängigkeit von der Art und dem Ausmaß der Fahrwasserbeschränkung (seitlich unbegrenztes Flachwasser oder seitlich und tiefenmäßig begrenztes Fahrwasser = Kanalfall) und dem von der Schiffahrt genutzten Geschwindigkeitsbereich (unterkritisches, kritisches oder überkritisches Geschwindigkeitsgebiet) unterschiedliche Bedeutung hinsichtlich der Wirkung auf das Gewässerbett zu (s. 4.2.2).

5.4.2 Fahrsituationen

Für die Bemessung sind die beiden im Folgenden beschriebenen Fahrsituationen zu unterscheiden.

5.4.2.1 Normalfahrt

Das Schiff fährt mit der zugelassenen Geschwindigkeit. In Kanälen (DEK, RHK, WDK u. a.) gelten z. B. folgende, nur vom Tiefgang abhängige Werte (s. § 15.04 BinSchStrO):

$$T < 1,3 \text{ m} \quad v_{zul} = 12 \text{ km/h}$$

$$T > 1,3 \text{ m} \quad v_{zul} = 10 \text{ km/h}$$

Bei kleineren Kanalquerschnitten ist v_{zul} geringer.

Die Fahrt kann mittig oder außermittig sein. Einer mittigen Fahrt mit geringem Tiefgang ist theoretisch die höchste kritische Schiffsgeschwindigkeit zugeord-

net. Mit zunehmendem Tiefgang und/oder mit zunehmend exzentrischer Fahrt (= größere Ufernähe) nimmt die kritische Schiffsgeschwindigkeit tendenziell ab. Zum Einfluss der Exzentrizität ist Folgendes zu beachten:

- (1) Zur Berücksichtigung der instationären Fahrsituation im Kanal bei Annäherung an das Ufer, bei der das Fahrzeug die in Kanalmitte größere mögliche Schiffsgeschwindigkeit zum Ufer hin mitnimmt, wird dieser Einfluss der Exzentrizität, der bei stationärer Fahrt zu einer Minderung der erreichbaren Schiffsgeschwindigkeit führen würde, nachfolgend vernachlässigt.
- (2) Unter Flachwasserbedingungen wird der dabei wesentlich größere Einfluss der Exzentrizität des Schiffspfades bzw. der Nähe des Ufers auf die kritische Schiffsgeschwindigkeit dagegen berücksichtigt.
- (3) Grundsätzlich, d. h. sowohl bei Kanalfahrt als auch bei der Fahrt mit Flachwassereffekten, ist der Einfluss der Exzentrizität auf den Wasserspiegelabsenk und die Wellenhöhe im Böschungsbereich zu berücksichtigen.

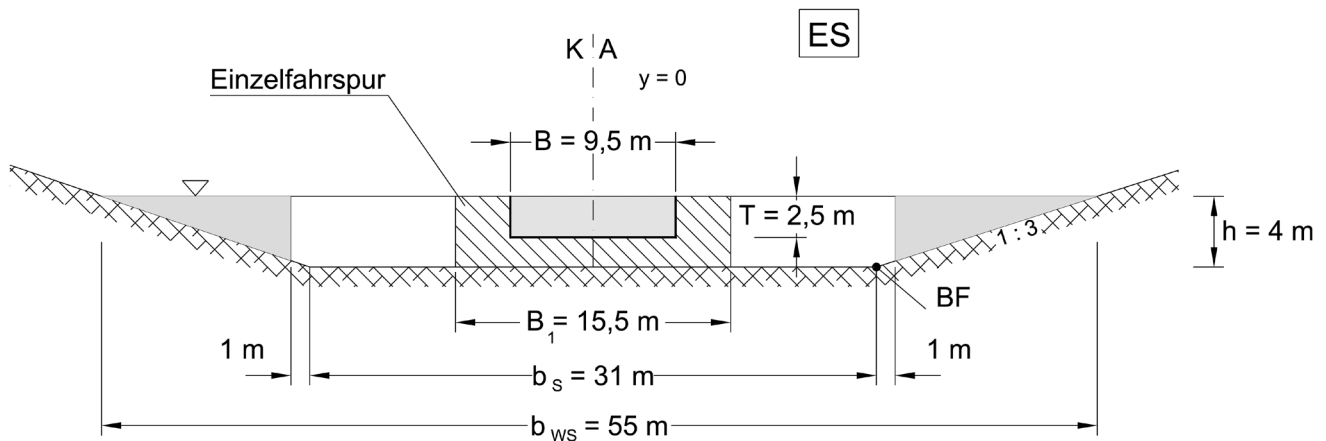
Bei der Festlegung der Bemessungssituationen sind deshalb Tiefgang und Uferabstand als wesentliche Einflussgrößen zu beachten.

Ein Einzelfahrer bewegt sich i. d. R. mittig oder außermittig am Rand einer an der Kanalachse orientierten Einzelfahrspur (s. Bild 5.2 a/b). Hierbei wird im Regelfall als Bemessungswert der Schiffsgeschwindigkeit $0,97 v_{krit}$ für die mittige Fahrt vorgeschlagen. In der Vorbereitungsphase für Begegnung oder Überholung kann das Schiff auch am äußersten Rand der nach Richtlinien für Standard-Kanalprofile /BMV 1994/ vorliegenden Doppelfahrspur fahren (s. Bild 5.2 c). Die Schiffskimm am Hauptspant liegt dabei über dem Böschungsfuß. Bei 2,8 m Abladetiefe, 0,5 m Squat und 0,2 m Mindestflottwasser entspricht dies gemäß den Richtlinien einem seitlichen Sicherheitsabstand von 1,5 m zur Uferböschung. Von diesem Wert kann auch für andere Kanalquerschnitte ausgegangen werden, um die Schiffposition der ufernahen Fahrt festzulegen. Auch für eine exzentrische Fahrposition ist in der Phase der Einzelfahrt von der o. g. Schiffsgeschwindigkeit auszugehen.

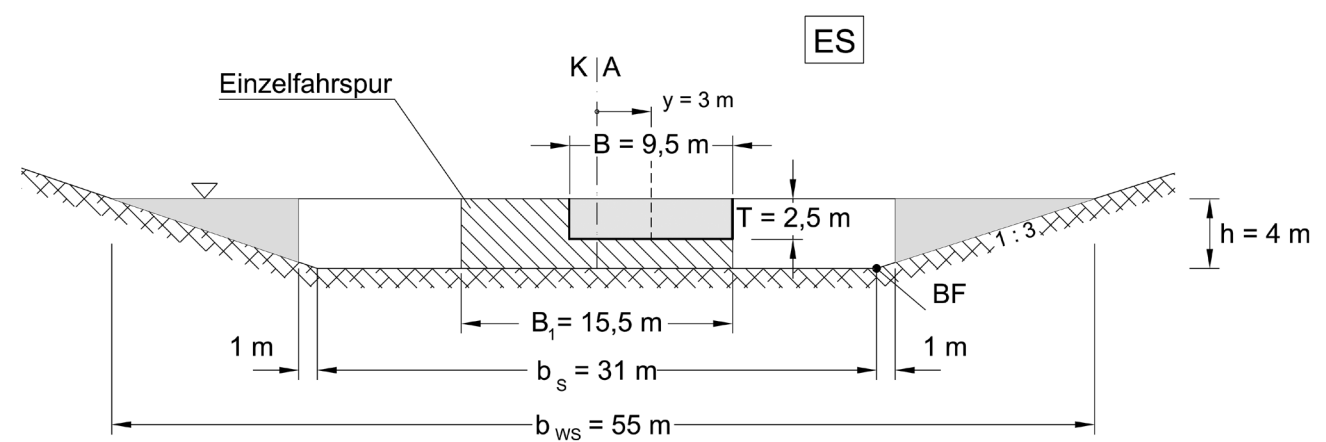
Auf die Sonderfälle Begegnung und Überholung wird in 5.5.6 eingegangen.

Der geringste noch mit den beschriebenen Verfahren zu erfassende Tiefgang beträgt ca. 1/3 der Wassertiefe.

a) Europaschiff ES mittig, ohne Driftwinkel



b) Europaschiff ES außermittig über Rand der Einzelfahrspur ($B_1 = 15,5$ m), ohne Driftwinkel



c) Großmotorschiff GMS außermittig über Böschungsfußpunkt ($b_s = 31,0$ m), ohne Driftwinkel

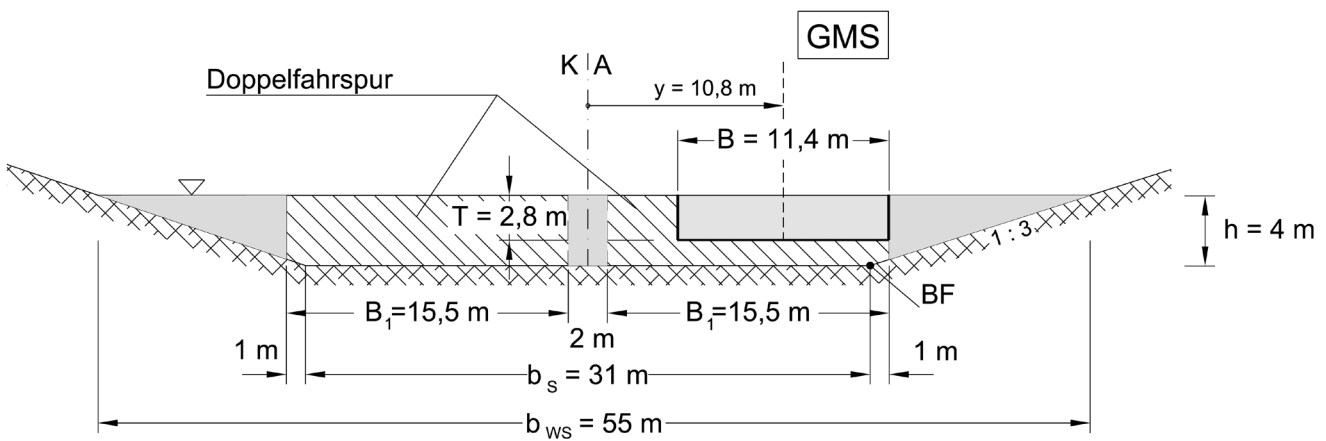


Bild 5.2 Beispiele für betrachtete Positionen der Schiffe ES und GMS im Regeltrapezprofil

- Abkürzungen: KA - Kanalachse
 BF - Böschungsfußpunkt
 Symbole: B - Schiffsbreite
 B_1 - Breite der Einzelfahrspur
 b_s - Sohlenbreite
 b_{ws} - Wasserspiegelbreite
 h - Wassertiefe
 T - Tiefgang des Schiffes

Die aus diesen Fahrtbedingungen folgenden maßgebenden hydraulischen Einwirkungen auf das Gewässerbett bzw. die Böschungs- und Sohlensicherung sind

- Wasserspiegelabsenkung infolge des vom Schiff erzeugten Schiffswellensystems und
- Wellenauflauf und -ablauf an den Uferböschungen infolge des vom Schiff erzeugten Wellensystems.

Weitere hydraulische Belastungen sind

- Rückströmung und
- Propellerstrahl (Abnahme mit steigendem Propellerfortschrittsgrad, d. h. Verringerung mit zunehmender Schiffsgeschwindigkeit).

5.4.2.2 Manövrierfahrt

Das Schiff manövriert mit geringer Geschwindigkeit $v_s \cong 0$ (Fortschrittsgrad des Propellers $J = 0$) mit maximalem Propellerschub in folgenden Situationen:

- An- und Ablegemanöver
- Beschleunigungsphase bei Schleusenausfahrten (standprobenähnliche Situation)

Die maßgebende hydraulische Einwirkung auf das Gewässerbett bzw. die Böschungs- und Sohlensicherung resultiert aus

- den Propellerstrahlen von Haupt- und Bugstrahlruder, die auf Böschung und Sohle auftreffen.

5.5 Größe von Schiffswellen (Bemessungssituation "Normalfahrt")

Das Primärwellenfeld um ein fahrendes Schiff ist ungleichförmig verteilt. In der Flachwasserfahrt tritt die größte Rückströmungsgeschwindigkeit unmittelbar am Schiff auf und klingt mit größer werdendem Abstand vom Schiff rasch ab. Bei ufernaher Fahrt mit Flachwassereinfluss tritt dieser Effekt am schiffnäheren Ufer nicht auf. Absenkung und Rückströmungsgeschwindigkeit können dort sogar größer sein als in Schiffsnähe. Bei der Kanalfahrt ist die Ungleichförmigkeit der Rückströmungs- und Absenkungsverteilung dagegen gering.

Zur rechnerischen Erfassung der Ungleichförmigkeit des Rückströmungsfeldes wird von der Vorstellung ausgegangen, dass sich die gesamte Rückströmung auf die Einflussbreite b_E konzentriert, d. h. in einem äquivalenten Kanalprofil erfolgt, und dort die Werte in Schiffsnähe annimmt. Dadurch wird die Anwendung der eindimensionalen Kanaltheorie ermöglicht. Sie liefert Absenkung und Rückströmungsgeschwindigkeit in Schiffsnähe und damit auch die kritische Schiffsgeschwindigkeit.

In 5.5.1.1 werden Näherungsformeln zur Ermittlung der Querschnittsfläche dieses äquivalenten Kanalprofils in Abhängigkeit von der Schiffslänge, der Kanal-

breite und dem Uferabstand als wesentliche Einflussparameter angegeben. Grundlage dieser Näherungsformeln ist die ebene Potenzialtheorie eines durch eine Quellen-Senken-Strömung angenäherten Schiffes /BAW 2004/.

Auf der gleichen Basis werden in 5.5.1.1 Näherungsformeln zum Verhältnis des Absenks am Ufer zu dem am Schiff angegeben. Unter Beachtung dieses Verhältnisses wird die hydraulisch äquivalente Böschungsneigung des als Trapezprofil approximierten äquivalenten Kanalprofils gewählt. Hieraus ergibt sich auch die mittlere Wassertiefe dieses Profils. Der zugehörige, für die Anwendung der 1D-Kanaltheorie erforderliche effektive Schiffsquerschnitt wird in 5.5.1.2 unter Berücksichtigung der Abladetiefen an Bug und Heck und des Verdrängungseffektes der Grenzschicht ermittelt.

In 5.5.2 wird aus diesen Daten die kritische Schiffsgeschwindigkeit berechnet. Sie bildet die Grundlage zur Wahl der Bemessungsschiffsgeschwindigkeit, die i. d. R. als Prozentsatz der kritischen Schiffsgeschwindigkeit festgelegt wird. In 5.5.3 werden dann für diese Geschwindigkeit im äquivalenten Kanalprofil der mittlere Wasserspiegelabsenkung und die mittlere Rückströmungsgeschwindigkeit ermittelt. Unter Berücksichtigung der in 5.5.1.1 angegebenen Näherungsgleichungen werden daraus die Werte am Ufer berechnet. Anschließend werden in 5.5.4.3 Absenkung und Rückströmungsgeschwindigkeit um die Einflüsse aus dem Wasserspiegellängsgefälle zwischen Bug- und Heckbereich und aus dem dynamischen Trimm korrigiert. Dies ist notwendig, weil die hier verwendete eindimensionale Kanaltheorie einer Potenzialströmung das Wasserspiegellängsgefälle unberücksichtigt lässt.

Mit dem so erhaltenen Maximalwert des örtlichen Wasserspiegelabsenkunges wird aus der Kontinuitätsgleichung die maximale Rückströmungsgeschwindigkeit am Ufer errechnet. Abschließend werden die Bemessungswerte der Wellenhöhen an Bug und Heck ermittelt (s. 5.5.4.4). Hierbei ist der Einfluss von Wellenteilheit und Shoaling-Effekten auf die Wellenhöhen zu beachten. Dies kann durch eine empirische Formel für den Einfluss der Exzentrizität des Schiffspfadens berücksichtigt werden /PIANC 1987a/.

Ein Überblick über die gesamte bis hier geschilderte Vorgehensweise ist auf Bild 5.3 skizziert.

Nachfolgend werden in 5.5.4.5 - 5.5.4.7 weitere Aspekte des Primärwellenfeldes beleuchtet: Wiederauffüllungsströmung, Einfluss des Driftwinkels und Absenkungsgeschwindigkeit. In 5.5.5 werden schließlich Sekundärwellen behandelt, die i. d. R. vom Primärwellenfeld getrennt auftreten. Sie können deshalb als eigenständige Belastungsgrößen betrachtet werden.

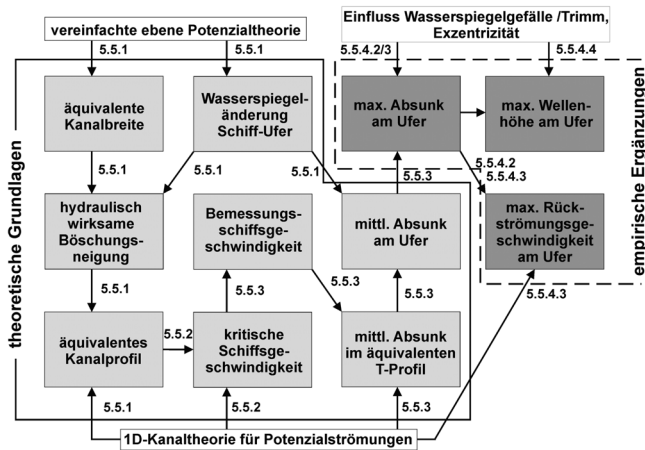


Bild 5.3: Vorgehensweise zur Ermittlung der hydraulischen Bemessungsgrößen wie maximale Rückströmungsgeschwindigkeit und maximale Wellenhöhen aus dem Primärwellenfeld fahrender Schiffe bei Flachwasser- und Grenzschichteneinflüssen mit Angabe der zugehörigen Kapitel

In 5.6 - 5.9 werden hydraulische Sonderbelastungen der Kanalauskleidung betrachtet wie Schraubenstrahl, Windwellen und sonstige Wellen (Schwall und Sunk, Hochwasserwelle). Abschließend werden in 5.10 die Porenwasserüberdrücke ermittelt, die für die geotechnischen Nachweise erforderlich sind.

5.5.1 Hydraulisch wirksamer Kanal- bzw. Schiffsquerschnitt

5.5.1.1 Flachwassereinfluss

Der maßgeblich an Absunk und Rückstrom beteiligte Bereich des Gewässerquerschnitts, der das äquivalente Kanalprofil bestimmt, ist abhängig von der **rechnerischen** Gewässerbreite

$$b_r = A/h \quad (5-1)$$

nach Bild 5.4, der wirksamen Einflussbreite des Rückströmungsfeldes (b_E), und der Schiffsposition (Exzentrizität) innerhalb des Gewässerquerschnitts. Dabei ergeben sich drei Breitenfälle, die in Bild 5.4 skizziert sind. Die Fallunterscheidungen und die zugehörigen Berechnungsgrundlagen gelten für Verhältnisse von Wassertiefe zu Tiefgang von $1,25 \leq h/T \leq 5$ [Kriebel 2003] und von Schiffslänge zu Schiffsbreite $L/B \geq 5$.

Für die praktische Anwendung empfiehlt sich eine Skizze mit den Abmessungen von Querprofil, Einflussbreite und Schiffsposition zur Zuordnung des Falls.

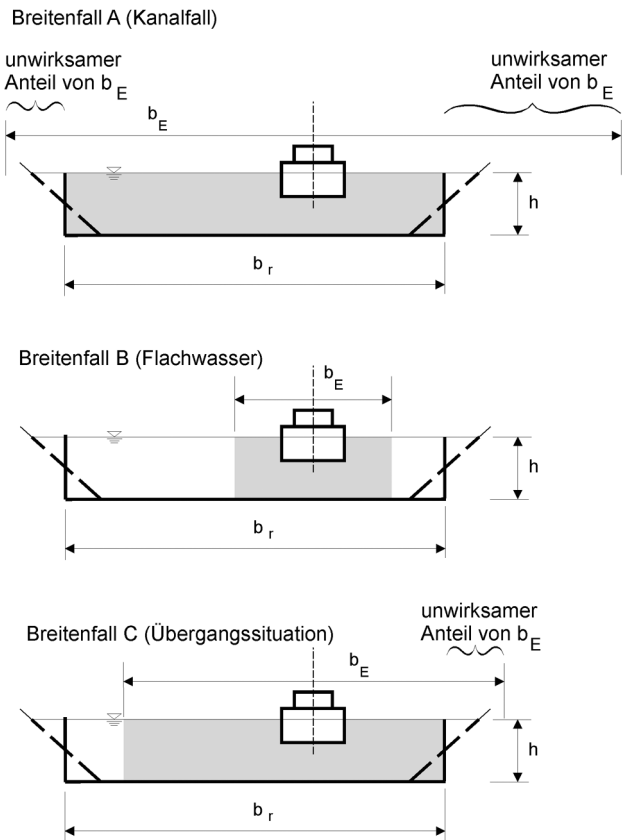


Bild 5.4 Grundfälle für das Verhältnis von Einflussbreite b_E des Rückströmungsfeldes zur rechnerischen Gewässerbreite b_r (eines Rechteckprofils gleichen Querschnitts bei gleicher Wassertiefe):
 A: Kanalfall: $b_E > b_r$
 B: Flachwasser: $b_E < b_r$
 C: Übergangssituation: b_E überdeckt ein Ufer

**Breitenfall A: „Kanalfall“
lange Schiffe, schmale Kanäle**

Für im Vergleich zur Kanalbreite lange Schiffsgefäße wirkt die Rückströmung über die gesamte Kanalbreite. Für die folgenden Berechnungen auf der Basis der eindimensionalen Kanaltheorie kann deshalb das Kanalprofil mit den Abmessungen

- b_{ws} Wasserspiegelbreite im Kanal [m]
- h Wassertiefe [m]
- m Böschungsneigung [-] entspricht Kotangens des Böschungswinkels β ($\tan \beta = 1/m$)

unmodifiziert verwendet werden:

$$A_{K,\text{äqui}} = A_K \quad (5-2)$$

$$A_{S,\text{äqui}} = A_{S,\text{eff}} \quad (5-3)$$

$$m_{K,\text{äqui}} = m \quad (5-4)$$

mit

A_K Kanalquerschnitt [m²],
 $A_K = h (b_{WS} - m h)$

$A_{K,äqui}$ äquivalenter Kanalquerschnitt [m²]

$A_{S,äqui}$ äquivalenter Schiffsquerschnitt [m²]

$A_{S,eff}$ effektive Querschnittsfläche des Schiffs [m²]
 ggf. unter Berücksichtigung von Grenzschicht-
 einflüssen und Driftwinkel

$m_{K,äqui}$ äquivalente Böschungsneigung [-]

Diese als Kanalfall bezeichnete Situation tritt auf, wenn der größere Abstand $u_{r,max}$ (s. Bild 5.5) zwischen Schiffsachse und gedachtem Ufer eines bei gleicher Wassertiefe flächengleichen Rechteck-Profiles (R-Profil) folgender Bedingung genügt:

$$u_{r,max} \leq \frac{b_E}{2} \quad (5-5)$$

mit

$u_{r,max}$ maximaler Uferabstand im äquivalenten Rechteckprofil [m] (s. Bild 5.5)

b_E Einflussbreite des Rückströmungsfeldes [m]

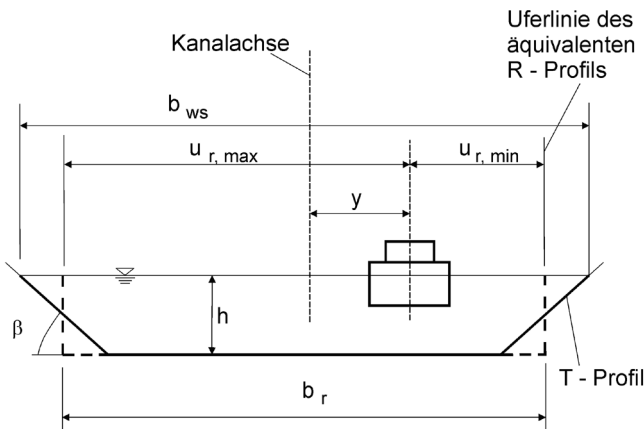


Bild 5.5 Definition der Uferabstände $u_{r,min}$ und $u_{r,max}$

Bei einem Trapezprofil mit gleichen Böschungsneigungen an beiden Ufern gilt:

$$\left\{ \begin{array}{l} b_r = b_{WS} - m h \\ u_{r,min} = \frac{1}{2} b_r - y \\ A = b_r h \end{array} \right\} \quad (5-6)$$

Für b_E gilt folgender, vom Schiffstyp abhängiger Ansatz:

Einflussbreite b_E des Rückströmungsfeldes [m]

$$b_E = \frac{\pi}{2} (L + f_B B) \quad (5-7)$$

mit

B Schiffsbreite [m]

f_B Faktor der Einflussbreite [-], abhängig vom Schiffstyp

$f_B = 3$ übliches Binnenschiff

$f_B \approx 1,5$ modernes, binnengängiges Seeschiff; Schiff mit Bugwulst

$f_B = 0$ Schiffgrundriss ellipsenförmig (entsprechend der Theorie)

L Schiffslänge (über alles) [m]

Den nachfolgend für genauere Berechnungen angebotenen Graphiken in Bild 5.7 und Bild 5.8 liegt Gl. (5-7) für $f_B = 3$ zu Grunde.

Um sie im allgemeinen Fall, d. h. für $f_B \neq 3$, anwenden zu können, ist das Verhältnis L / B in Bild 5.7 und Bild 5.8 durch L_{eff} / B zu ersetzen. Für schlanke Schiffe gilt für die effektive Schiffslänge:

effektive Schiffslänge L_{eff} [m]

$$L_{eff} = L + B(f_B - 3) \quad (5-8)$$

Schon im Kanalfall können geringe Flachwassereffekte auftreten. Diese können hinsichtlich der äquivalenten Querschnittsfläche für eine genauere Berechnung nach Bild 5.7, das aus der vereinfachten ebenen Potenzialtheorie abgeleitet wurde, berücksichtigt werden. Die äquivalente Kanalquerschnittsfläche $A_{K,äqui}$ ergibt sich dabei aus

äquivalente Kanalquerschnittsfläche $A_{K,äqui}$

$$A_{K,äqui} = b_{r,äqui} h \quad (5-9)$$

mit

$b_{r,äqui}$ rechnerische Breite des äquivalenten Kanalprofils [m]

h Wassertiefe [m]

Die Veränderung der Rückströmungsgeschwindigkeit und des Absunks zwischen Schiff und Ufer ist im Kanalfall gering und kann i. d. R. vernachlässigt werden. Beim Übergang vom Breitenfall A zu den Breitenfällen B und C kann für eine genauere Berechnung wie folgt vorgegangen werden:

Die mit der äquivalenten Schiffsquerschnittsfläche ermittelten Kenngrößen

- mittlere Wasserspiegelabsenkung $\Delta\bar{h}$ nach Gl. (5-25) in 5.5.3 und
- mittlere Rückströmungsgeschwindigkeit $\bar{v}_{\text{rück}}$ nach Gl. (5-23) in 5.5.3

verringern bzw. erhöhen sich zwischen Schiff und Ufer (Index 'u') auf neue Werte (s. Gln. (5-26) und (5-27)):

$$\Delta\bar{h} \rightarrow \Delta\bar{h}_u$$

$$\bar{v}_{\text{rück}} \rightarrow \bar{v}_{\text{rück,u}}$$

mit

$\Delta\bar{h}$ in Längs- und Querrichtung gemittelte Wasserspiegelabsenkung [m]

$\Delta\bar{h}_u$ in Längsrichtung am Ufer gemittelte Wasserspiegelabsenkung [m]

$\bar{v}_{\text{rück}}$ in Längs- und Querrichtung gemittelte Rückströmungsgeschwindigkeit [m/s]

$\bar{v}_{\text{rück,u}}$ in Längsrichtung am Ufer gemittelte Rückströmungsgeschwindigkeit [m/s]

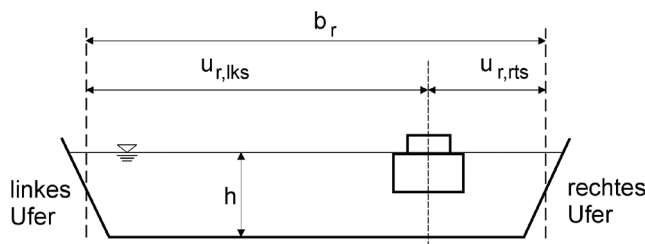


Bild 5.6 Skizze zu den rechnerischen Uferabständen und der rechnerischen Gewässerbite

Abhängig vom Verhältnis der Schiffslänge zur rechnerischen Kanalbreite L / b_r können die Verhältnswerte $\Delta\bar{h}_u / \Delta\bar{h}$ bzw. $\bar{v}_{\text{rück,u}} / \bar{v}_{\text{rück}}$, gültig für das rechte Ufer, in Abhängigkeit vom rechnerischen rechten Uferabstand $u_{r,rts} / b_r$ (Definitionen s. Bild 5.6) näherungsweise (Schiff als umströmter Dipol) aus Bild 5.8 ermittelt werden. Zur Anwendung für das linke Ufer muss Bild 5.8 spiegelbildlich interpretiert werden ($u_{r,rts}$ durch $u_{r,lks}$ ersetzen). Es unterscheidet wichtige Fälle von L / B . Typische Längen- zu Breitenverhältnisse L / B sind

Europaschiff ES:	8,4
Großmotorgüterschiff GMS:	9,7
2er Schubverband 2SV:	16,2
4er Schubverband 4SV:	8,1

Diese exakten Werte sind bei der Anwendung von Bild 5.7 und Bild 5.8 sinnvoll zu interpolieren.

Die für die genaueren Berechnungen im äquivalenten Kanalprofil in diesem Fall anzusetzende Böschungsneigung $m_{K,\text{äqui}}$ kann geringfügig gegenüber der des Original-Kanalprofils verändert sein. Sie ergibt sich folgendermaßen:

rechnerische Böschungsneigung $m_{K,\text{äqui}}$ [-] im äquivalenten Kanalprofil

$$m_{K,\text{äqui}} \approx \frac{1}{2} \left(m_{lks} \frac{\Delta\bar{h}_{u,lks}}{\Delta\bar{h}} + m_{rts} \frac{\Delta\bar{h}_{u,rts}}{\Delta\bar{h}} \right) \quad (5-10)$$

mit

$m_{K,\text{äqui}}$ äquivalente Böschungsneigung [-] nur für die hydraulische Berechnung von Absenk und Rückströmung (äquivalente Böschungsneigung = Kotangens des Böschungswinkels des äquivalenten Kanalprofils)

$m_{K,\text{äqui}}$ gilt nicht für die Berechnungen in Kap. 6 und 7

m_{lks} Böschungsneigung am linken Ufer [-]

m_{rts} Böschungsneigung am rechten Ufer [-]

$\frac{\Delta\bar{h}_{u,lks}}{\Delta\bar{h}}$ relativer Absenk am rechnerischen linken Ufer [-] nach Bild 5.8

$\frac{\Delta\bar{h}_{u,rts}}{\Delta\bar{h}}$ relativer Absenk am rechnerischen rechten Ufer [-] nach Bild 5.8

Das rechnerische, d. h. das für die weitere Berechnung verwendete äquivalente Trapezprofil hat dann die Werte $A_{K,\text{äqui}}$, $m_{K,\text{äqui}}$ und h . Hieraus ergibt sich z. B. die äquivalente Wasserspiegelbreite $b_{WS,\text{äqui}}$ zu:

äquivalente Wasserspiegelbreite $b_{WS,\text{äqui}}$ [m]

$$b_{WS,\text{äqui}} = m_{K,\text{äqui}} h + A_{K,\text{äqui}} / h \quad (5-11)$$

mit

$A_{K,\text{äqui}}$ äquivalenter Kanalquerschnitt [m²] nach Gl. (5-9) in 5.5.1

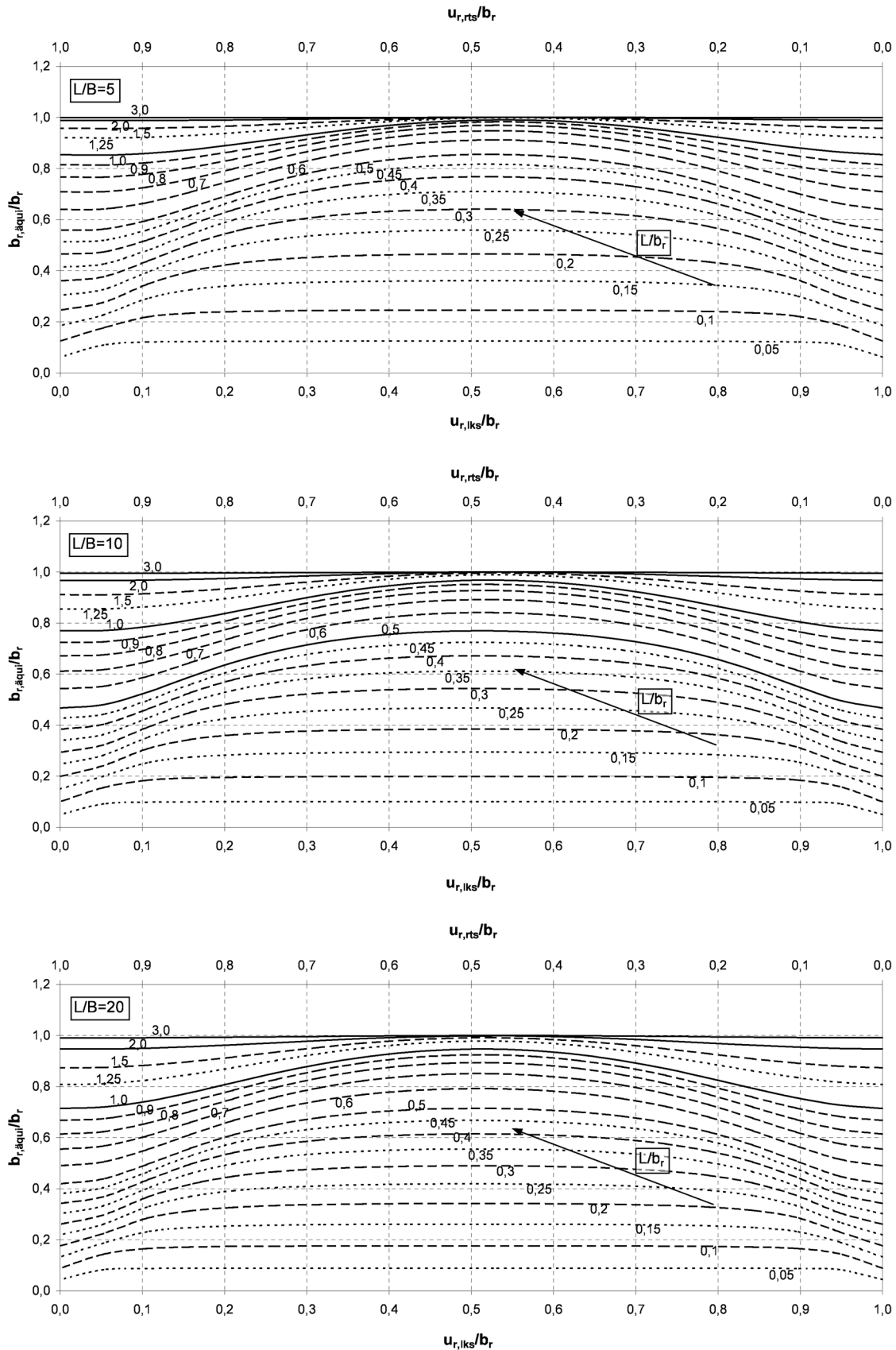


Bild 5.7 Rechnerische Breite des äquivalenten Kanalprofils $b_{r,\text{äqui}}$ als Funktion von rechnerischer Kanalbreite b_r (Definition s. Bild 5.5 und Bild 5.6) und den rechnerischen Uferabständen $u_{r,rs}$ zum rechten bzw. $u_{r,lks}$ zum linken Ufer (Definition s. Bild 5.6) sowie von Schiffslänge L und Schiffsbreite B für die Fälle $L/B = 5, 10$ und 20 (für $f_B \neq 3$ in Gl. (5-7) ist L durch L_{eff} nach Gl. (5-8) zu ersetzen)

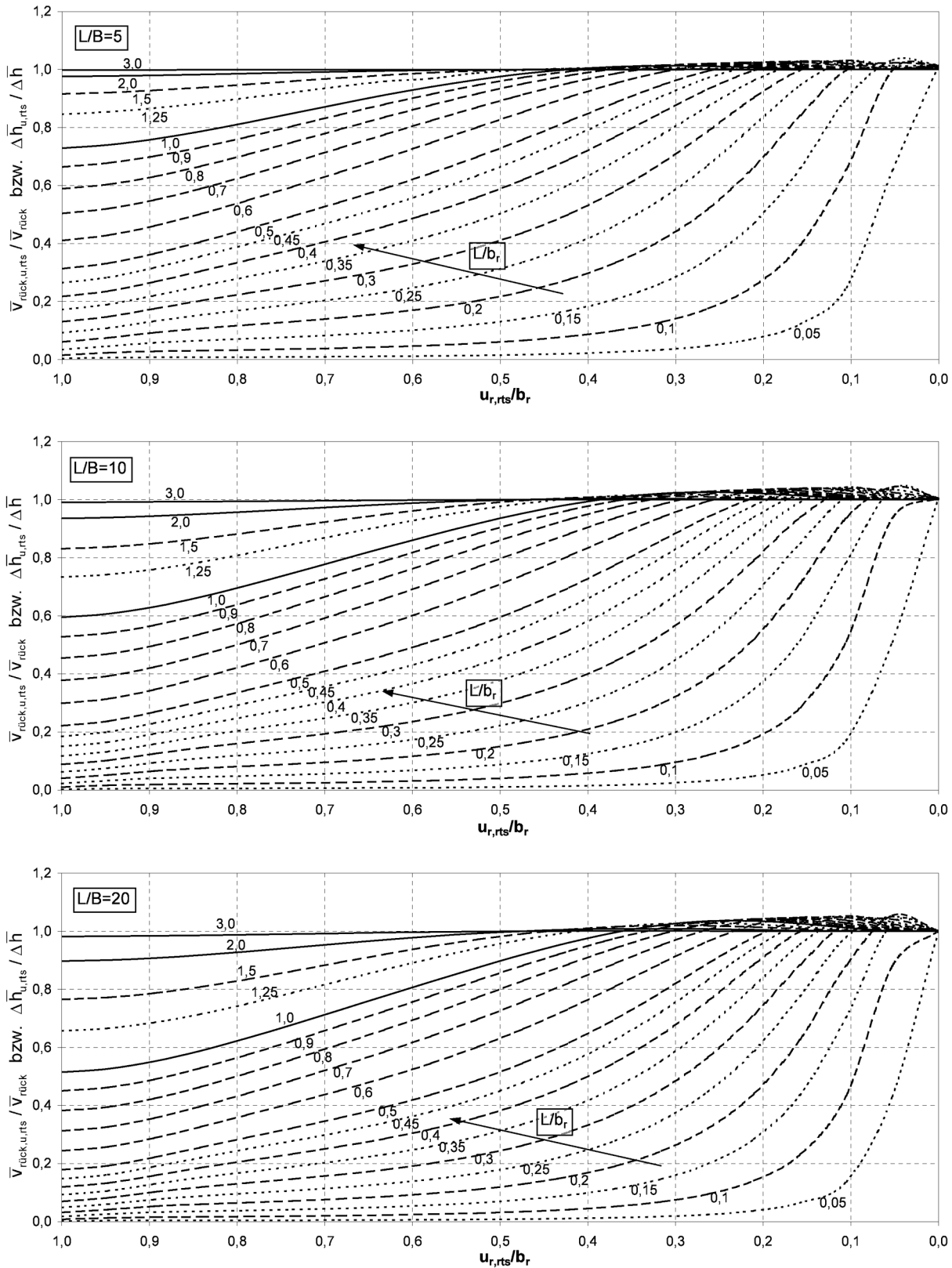


Bild 5.8 Mittlere Rückströmungsgeschwindigkeit ($\bar{v}_{\text{rück,u,rts}}$) bzw. Absenk ($\Delta\bar{h}_{\text{u,rts}}$) am rechnerischen (Index r) rechten (Index rts) Ufer (Index u) in Relation zu den entsprechenden Werten am Schiff ($\bar{v}_{\text{rück}}, \Delta\bar{h}$), den Uferabständen $u_{r,\text{rts}}$ zum rechnerischen rechten und $u_{r,\text{lks}}$ zum rechnerischen linken Ufer (Definition s. Bild 5.6) sowie Schiffslänge L und Schiffsbreite B für die Fälle $L/B = 5, 10$ und 20 . Um die Werte am linken Ufer zu ermitteln, ist $u_{r,\text{rts}}$ durch $u_{r,\text{lks}}$ zu ersetzen (spiegelbildliche Anwendung)

**Breitenfall B: „Flachwasser“
kurze Schiffe, große Uferabstände**

Für im Vergleich zur Kanalbreite kurze Fahrzeuglängen und für sehr große Uferabstände liegen Flachwasserverhältnisse vor. Dieser Breitenfall tritt auf, wenn der kleinste Uferabstand $u_{r,min}$ gemäß Bild 5.5 folgendem Kriterium genügt:

$$u_{r,min} > \frac{b_E}{2} \quad (5-12)$$

mit

b_E Einflussbreite nach Gl. (5-7)

$u_{r,min}$ minimaler Uferabstand im rechnerischen Profil [m] (Definition s. Bild 5.5)

Die eindimensionale Kanaltheorie kann dann näherungsweise auf folgenden, in der Breite durch b_E begrenzten, äquivalenten Kanalquerschnitt $A_{K,äqui}$ angewendet werden:

$$A_{K,äqui} = b_E h \quad (5-13)$$

Für sehr große Uferabstände, d. h. für $u_{r,min} \gg b_E/2$, ist die Böschungsneigung des äquivalenten Kanalprofils

$m_{K,äqui} \approx 0$. In diesem Fall klingen Rückströmungsgeschwindigkeit und Absenk bis zum Ufer (Abstand u_r) näherungsweise wie folgt ab:

$$\frac{\bar{v}_{rück,u}}{\bar{v}_{rück}} = \frac{\Delta\bar{h}_u}{\Delta\bar{h}} \approx \frac{1}{1 + \left(\frac{u_r \pi}{b_E}\right)^2} \quad (5-14)$$

Für eine genauere Berechnung, insbesondere im Übergang des Breitenfalls B zu den Breitenfällen A und C, ist das wesentlich schwächere Abklingen des Rückströmungsfeldes zu berücksichtigen. In diesem Fall sollte wie folgt vorgegangen werden:

- $A_{K,äqui}$ nach Gl. (5-9)
- $b_{r,äqui}$ nach Bild 5.7
- $m_{K,äqui}$ nach Gl. (5-10)
- $b_{WS,äqui}$ nach Gl. (5-11)
- Veränderung von $\Delta\bar{h}$ und $\bar{v}_{rück}$ zwischen Schiff und Ufer zu den neuen Werten $\Delta\bar{h}_u$ und $\bar{v}_{rück,u}$ nach Bild 5.8

**Breitenfall C: „Übergangssituation“
Übergang zwischen Kanal- und Flachwasserfahrt**

Im Übergangsbereich zwischen Kanal- und Flachwasserfahrt überlappt sich der Einflussbereich b_E mit dem schiffsnäheren Ufer. Der Übergangsbereich genügt somit folgendem Kriterium:

$$u_{r,min} \leq \frac{b_E}{2} \leq u_{r,max} \quad (5-15)$$

Das äquivalente Kanalprofil ergibt sich näherungsweise durch Abschneiden des unwirksamen Anteils der Einflussbreite b_E (s. Bild 5.4). Die zugehörige äquivalente Querschnittsfläche $A_{K,äqui}$ ergibt sich dabei zu:

$$A_{K,äqui} = \left(\frac{b_E}{2} + u_{r,min}\right) h \quad (5-16)$$

Die zugehörige äquivalente Böschungsneigung beträgt $m_{K,äqui} \approx m / 2$.

Am schiffsnäheren Ufer ist in erster Näherung davon auszugehen, dass $\bar{v}_{rück,u} = \bar{v}_{rück}$ und $\Delta\bar{h}_u = \Delta\bar{h}$ ist. Für eine genauere Berechnung wird auf die Gln. (5-9), (5-10) und (5-11) sowie auf Bild 5.7 und Bild 5.8 verwiesen.

5.5.1.2 Grenzschichteinfluss

Die angesprochene Berücksichtigung von Grenzschichteffekten, mit denen näherungsweise die in der 1D-Kanaltheorie vernachlässigten Energieverluste am Schiffskörper erfasst werden können, erfolgt getrennt für Bug- und Heckbereich durch eine effektive Schiffsquerschnittsfläche $A_{S,eff}$ im Bereich des prismatischen Schiffskörpers (Hauptspant):

Bug (vernachlässigbare Grenzschichteffekte):

effektive Schiffsquerschnittsfläche im Bugbereich $A_{S,eff,B}$ [m²]

$$A_{S,eff,B} = A_{S,B} = B_B T_B \gamma_B \quad (5-17)$$

mit

- $A_{S,B}$ Schiffsquerschnittsfläche im Bugbereich [m²]
- B_B Schiffsbreite im Bugbereich [m]
- T_B Schiffstiefgang im Bugbereich [m]
- γ_B Völligkeitsgrad des Schiffsquerschnitts im Bugbereich [-], in der Regel $\gamma_B = 1,0$ (prismatisches Mittelschiff)
Beachte: nicht zu verwechseln mit der Völligkeit des Schiffsvolumens

Heck (größte Grenzschnittdicke):

effektive Schiffsquerschnittsfläche im Heckbereich
 $A_{S,eff,H}$ [m²]

$$\left. \begin{aligned} &A_{S,eff,H} = A_{S,H} + \delta_{1H} (B_m + 2 T_m) \\ &A_{S,H} = T_H B_H \gamma_H \\ &\delta_{1H} = 0,645 L_H \left(1,89 + 1,62 \log_{10} \frac{L_H}{K_{SS}} \right)^{-2,5} \end{aligned} \right\} (5-18)$$

mit

- $A_{S,H}$ Schiffsquerschnittsfläche im Heckbereich bzw. an der Stelle der größten Verdrängung [m²]
- B_H Schiffsbreite im Heckbereich [m]
- B_m mittlere Schiffsbreite zwischen Bug und Heck [m]
- K_{SS} äquivalente Sandrauheit der Schiffshaut [m]
 $K_{SS} \approx 0,3 \cdot 10^{-3} - 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- L_H Entwicklungslänge der Grenzschnitt zwischen Bug und Hauptspantende [m]
- T_H Schiffstiefgang im Heckbereich [m]
- T_m mittlerer Schiffstiefgang zwischen Bug und Heck [m]
- γ_H Völligkeitsgrad des Schiffsquerschnitts im Heckbereich [-], in der Regel $\gamma_H = 1,0$ (prismatisches Mittelschiff)
 Beachte: nicht zu verwechseln mit der Völligkeit des Schiffsvolumens
- δ_{1H} Verdrängungsdicke im Heckbereich [m], kann nicht größer werden als die Flottwassertiefe

Wenn das Fahrzeug keinen prismatischen Schiffskörper aufweist, wie dies häufig bei Schleppern der Fall ist, kann näherungsweise für $A_{S,eff}$ der Querschnitt mit der größten Verdrängung gewählt werden. Dort ist dann auch die Verdrängungsdicke zu ermitteln.

5.5.2 Kritische Schiffsgeschwindigkeit der Kanalfahrt

Schiffsumströmung und Wellenbildung unterliegen im seitlich und tiefenmäßig begrenzten Fahrwasser mit steigender Schiffsgeschwindigkeit typischen Veränderungen. Während im sogenannten "unterkritischen" Geschwindigkeitsgebiet das vom Schiff verdrängte Wasser im "strömenden" Zustand entgegen der Fahrtrichtung am Schiff vorbeigeführt wird, setzt mit dem Erreichen der kritischen Schiffsgeschwindigkeit der

instationäre Aufbau des zum Umschlag in den Zustand "Schießen" erforderlichen kritischen Gefälles ein.

Die Analyse der Messergebnisse von Naturversuchen in einem Kanal (ca. Regeltrapezprofil nach /BMV 1994/) mit einem modernen Großmotorgüterschiff /BAW 2004/ legt nahe, bei der Berechnung der kritischen Schiffsgeschwindigkeit die Grenzschnitt um den Schiffsrumpf und Flachwassereffekte gemäß 5.5.1 über $A_{K,äqui}$ und $A_{S,eff}$ zu berücksichtigen. Der Einfluss der Exzentrizität auf die kritische Schiffsgeschwindigkeit erwies sich bei den Versuchen /BAW 2004/, unter Berücksichtigung der instationären Fahrsituation bei Annäherung an das Ufer, nur für den Breitenfall C in 5.5.1, also bei ufernaher Fahrt eines im Vergleich zur Kanalbreite kurzen Schiffes, als signifikant. Er wird nachfolgend über die gegenüber dem Original-Kanalprofil reduzierte Kanalbreite berücksichtigt. Einen geringen Einfluss auf die kritische Schiffsgeschwindigkeit hatte die Vertrimmung. Bei hecklastiger Vortrimmung und bei stark dynamischem hecklastigen Trimm wird die kritische Schiffsgeschwindigkeit tendenziell kleiner bzw. die Wellenhöhen werden tendenziell größer als bei nicht vertrimmten Schiffen. Danach gelten für den mittleren Wasserspiegelabsenk bei kritischer Schiffsgeschwindigkeit $\Delta \bar{h}_{krit}$ und für die kritische Schiffsgeschwindigkeit v_{krit} (Geschwindigkeit relativ zum Wasser) folgende Gleichungen (Bild 5.9):

kritische Schiffsgeschwindigkeit v_{krit} [m/s],
 zugehöriger mittlerer Wasserspiegelabsenk $\Delta \bar{h}_{krit}$ [m]

$$\left. \begin{aligned} &\Delta \bar{h}_{krit} = x_{krit} h_m \\ &v_{krit} = y_{krit} \sqrt{gh_m} \end{aligned} \right\} (5-19)$$

Die Berechnung von x_{krit} und y_{krit} erfolgt iterativ über folgende Hilfsfunktionen:

$$\beta = 1 - \frac{1}{n}$$

$$\tilde{f} = \frac{mh_m}{b_{WS}}$$

$$f = 1 - x_{krit} \tilde{f}$$

(Hier muss x_{krit} (s. u.) vorgegeben werden - Rücksprungadresse bei Iteration)

$$f^* = \frac{2}{f} (1 - 2f)$$

$$\tilde{r} = \frac{1 - f^*}{3}$$

$$\tilde{x}_{krit} = -2\tilde{r}^{1/2} \cos\left\{\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos\left[\frac{\beta f^*}{2\tilde{r}^{3/2}}\right]\right\}$$

Beachte: Berechnungen in Bogenmaß

$$x_{krit} = \frac{\beta - \tilde{x}_{krit}}{f}$$

Beachte: Ab hier Rücksprung zur Berechnung von f , bis Ergebnis ausreichend stabil

$$y_{krit} = \left[\frac{2x_{krit}}{(\beta - x_{krit} f)^2 - 1} \right]^{1/2}$$

Die Hilfsfunktionen sind mit folgenden Kennwerten des Kanals und des Schiffes verbunden:

$A_{K,\text{äqui}}$ äquivalenter Kanalquerschnitt [m²] nach Gl. (5-9) in 5.5.1

$A_{S,\text{eff}}$ effektiver Schiffsquerschnitt [m²] unter Berücksichtigung von Grenzschichteffekten an Bug und Heck nach 5.5.1 und 5.5.4.6

b_{WS} Wasserspiegelbreite [m]
 $b_{WS} = b_{WS,\text{äqui}}$ nach Gl. (5-11) in 5.5.1.1

h_m mittlere Wassertiefe [m], $h_m = A_{K,\text{äqui}} / b_{WS,\text{äqui}}$

m Böschungsneigung [-]
 $m = m_{K,\text{äqui}}$ nach Gl. (5-10) in 5.5.1.1

n Querschnittsverhältnis [-]
 $n = n_{\text{äqui}} = A_{K,\text{äqui}} / A_{S,\text{eff}}$ (äquivalentes Q.)

Bei der Iteration kann als erste Schätzung für x_{krit} die Lösung für ein Rechteckprofil wie folgt herangezogen werden:

$$x_{krit} = \beta + 2\cos\left[\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos(-\beta)\right]$$

Die dimensionslosen Werte y_{krit} für die kritische Schiffsgeschwindigkeit und x_{krit} für den kritischen Absunk sind in erster Linie vom n -Verhältnis abhängig. Einen geringen Einfluss auf v_{krit} hat der Formparameter \tilde{f} , der die Form des Kanalprofils beschreibt (s. Bild 5.9). Für überschlägliche Berechnungen kann der Einfluss von \tilde{f} auf v_{krit} vernachlässigt werden. Für typische n -Verhältnisse ergibt sich dann v_{krit} aus Bild 5.9. Der Einfluss von \tilde{f} auf x_{krit} ist aus Bild 5.9 und Bild 5.12 ersichtlich, aus denen Näherungswerte ermittelt werden können.

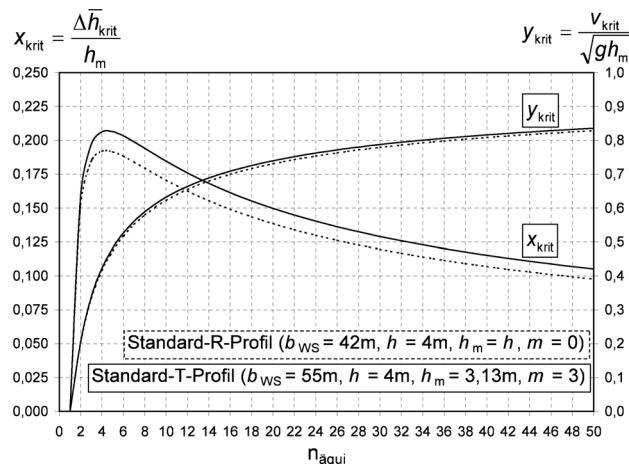


Bild 5.9 Abhängigkeit der kritischen Schiffsgeschwindigkeit v_{krit} und des zugehörigen mittleren Absunks $\Delta\bar{h}_{krit}$ von $n_{\text{äqui}}$ am Beispiel von Standard-T- und -R-Profil

In Sonderfällen, wie Gewässerquerschnitte mit stark ungleichförmiger Wassertiefe (z. B. Querschnitt mit Bermen oder Fahrrinnenbaggerungen), gelten für die kritische Geschwindigkeit veränderte Ansätze, die alternativ zu der angegebenen Näherungsgleichung (5-19) u. a. in /Römisch 1989/ nachzulesen sind.

Bei Fahrt mit Drift ist ein größerer effektiver Schiffsquerschnitt anzusetzen (s. 5.5.4.6).

5.5.3 Mittlerer Absunk und Rückströmungsgeschwindigkeit bei mittiger Kanalfahrt

Die eindimensionale Berechnung der bei stationärer Kanalfahrt eines Schiffes entstehenden Rückströmungsgeschwindigkeit und Wasserspiegelabsenkung beruht auf der BERNOULLISchen Gleichung (Energieerhaltung) und der Kontinuitätsgleichung (Massenerhaltung), angewendet auf den ungestörten Kanalquerschnitt vor dem Schiff und den durch den eingetauchten Hauptspantquerschnitt und die Wasserspiegelabsenkung eingeeengten Querschnitt neben dem Schiff (s. Bild 5.10). Der Kanalquerschnitt strömt dabei auf das gedanklich "festgehaltene" Schiff mit der Schiffsgeschwindigkeit v_S (relativ zum Wasser) zu. Vorausgesetzt werden die gleichmäßige Strömungsverteilung über den Querschnitt, die der mittleren Wasserspiegelabsenkung im engsten Durchflussquerschnitt (Querschnitt mit der größten Wasserspiegelabsenkung) entsprechende Einsinktiefen des Schiffes (vereinfachende Annahme: Squat = Wasserspiegelabsenkung) und die Vernachlässigung von Energieverlusten. Weiterhin bleibt eine dynamische Vertrimmung des Schiffes unberücksichtigt. Mit Ausnahme von Fließquerschnitten mit großer Sohlenrauheit und hohen Turbulenzen aus einem aufgeprägten Strömungsfeld liefert die eindimensionale Kanaltheorie, trotz der genannten Vereinfachungen, zuverlässige Ergebnisse, wenn die nicht berücksichtigten Einflüsse

durch empirische Korrekturen im Nachhinein erfasst werden.

Grenzschichteffekte am Schiff und Flachwassereffekte können zur Anwendung der 1D-Kanaltheorie näherungsweise mit den in 5.5.1 angegebenen Algorithmen durch eine äquivalente Kanalquerschnittsfläche $A_{K,äqui}$ und eine effektive Schiffsquerschnittsfläche $A_{S,eff}$ berücksichtigt werden. Der Einfluss einer Grundströmung auf die Absunkberechnung bei vorgegebenem $v_{SüG}$ wird durch Errechnung der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser v_S berücksichtigt:

$$\text{Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser } v_S \text{ [m/s]}$$

$$v_S = v_{Str} \pm v_{SüG} \quad (5-20)$$

(+: Bergfahrt, -: Talfahrt)

mit

v_{Str} Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

$v_{SüG}$ Schiffsgeschwindigkeit über Grund [m/s]

Wird für Bemessungszwecke z. B. von $v_S = 0,97v_{krit}$ ausgegangen, dann entspricht dies der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser. Die Strömungsgeschwindigkeit ist dann ohne Belang für die Absunkberechnung. Alle nachfolgend angegebenen Geschwindigkeiten sind danach relativ zum umgebenden Wasserkörper gemessen. Für die Bemessung der erforderlichen Steingröße ist die Grundströmung erhöhend bzw. reduzierend zu berücksichtigen, siehe Gl. (6-13) in 6.7.2

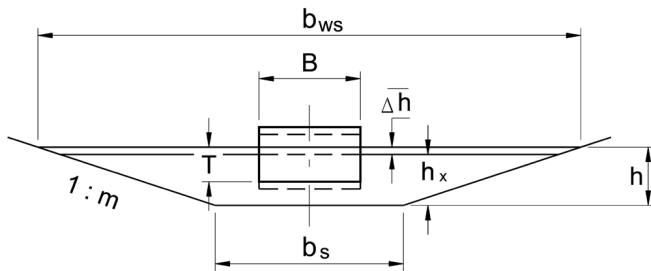


Bild 5.10 Definitionsskizze zur Berechnung der Verdrängungsströmung; Symbole z. T. s. Text sowie Gl. (5-21) und (5-22)

Es gelten dann die folgenden beiden Grundbeziehungen:

1. Aus der BERNOULLI'schen Gleichung ergibt sich die über die Kanalbreite gemittelte maximale Wasserspiegelabsenkung $\Delta\bar{h}$ im engsten Durchflussquerschnitt neben dem Schiff (s. Bild 5.10):

$$\begin{aligned} \Delta\bar{h} &= h - h_x = \\ &= \frac{1}{2g} \left[\alpha_1 (v_S + \bar{v}_{rück})^2 - v_S^2 \right] \end{aligned} \quad (5-21)$$

2. Nach der Kontinuitätsgleichung

$$A v_S = \left[A - (A_M + b_m \Delta\bar{h}) \right] (v_S + \bar{v}_{rück}) \quad (5-22)$$

lautet die zugehörige querschnittsgemittelte Rückströmungsgeschwindigkeit am Bug bzw. Heck:

Querschnittsgemittelte Rückströmungsgeschwindigkeit $\bar{v}_{rück}$ [m/s]

$$\bar{v}_{rück} = \frac{A_M + b_m \Delta\bar{h}}{A - (A_M + b_m \Delta\bar{h})} v_S = \frac{\Delta A}{A - \Delta A} v_S \quad (5-23)$$

mit

A Kanalquerschnitt [m²]
 $A = A_{K,äqui}$ nach 5.5.1.1

A_M eingetauchter Hauptspantquerschnitt des Schiffes (unter Berücksichtigung von Grenzschicht- und Flachwassereffekten an Bug oder Heck) [m²]
 $A_M = A_{S,eff}$ nach 5.5.1.2 und 5.5.4.6

ΔA Querschnittsreduzierung im Kanal infolge Schiffsquerschnitt und Absunk [m²]
 $\Delta A = A_M + b_m \Delta\bar{h}$

b_m mittlere Wasserspiegelbreite im Bereich der Wasserspiegelabsenkung [m]
 $b_m = b_{WS} - \Delta\bar{h} m$

b_S Sohlenbreite [m]

b_{WS} Wasserspiegelbreite [m]
 $b_{WS} = b_{WS,äqui}$ nach Gl. (5-11) in 5.5.1.1

g Erdbeschleunigung [m/s²]

h Kanalwassertiefe [m]

h_x Wassertiefe im engsten Durchflussquerschnitt [m]

$\Delta\bar{h}$ über die Kanalbreite gemittelte maximale Wasserspiegelabsenkung im engsten Durchflussquerschnitt [m]

m Böschungsneigung [-]
 $m = m_{K,äqui}$ nach Gl. (5-10) in 5.5.1.1

T Tauchtiefe am Hauptspant [m]

v_S Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser [m/s] nach Gl. (5-20)

$\bar{v}_{rück}$ mittlere Rückströmungsgeschwindigkeit [m/s] (relativ zu einem mit v_{Str} bewegten Beobachter)

α_1 Korrekturbeiwert [-] nach Gl. (5-24)

Ein Korrekturbeiwert, der u. a. den Einfluss der Ungleichförmigkeit des Rückstromfeldes in Abhängigkeit von der Nähe der gefahrenen zur kritischen Schiffsgeschwindigkeit beschreibt, wird von *Przedwojski et al. 1995* angegeben:

$$\alpha_1 = 1,4 - 0,4 \frac{v_S}{v_{krit}} \quad (5-24)$$

Aus Gl. (5-21) wird der implizite Berechnungsansatz für die Beziehung $\Delta\bar{h} = f(v_S)$ abgeleitet:

Zusammenhang von Schiffsgeschwindigkeit v_S [m/s] und mittlerer Wasserspiegelabsenkung $\Delta\bar{h}$ [m]

$$v_S = \sqrt{\frac{2 g \Delta\bar{h}}{\alpha_1 \left(\frac{A}{A - \Delta A} \right)^2 - 1}} \quad (5-25)$$

Seine Lösung erfolgt iterativ bei Vorgabe von $\Delta\bar{h}$ (übliche Größenordnung 0,2 - 0,5 m) solange, bis die Bemessungsschiffsgeschwindigkeit mit der berechneten übereinstimmt. Hierzu empfiehlt es sich, die errechnete Schiffsgeschwindigkeit v_S als Funktion von $\Delta\bar{h}$ aufzutragen (s. Bild 5.11). $\bar{v}_{rück}$ ergibt sich danach aus Gl. (5-23).

Für überschlägliche Berechnungen kann auf die genaue Lösung der Gl. (5-25) verzichtet werden. Stattdessen kann mit v_S / v_{krit} , n -Verhältnis, Formparameter \tilde{f} und Bild 5.12 gearbeitet werden.

Die Werte der Rückströmungsgeschwindigkeit $\bar{v}_{rück}$ und des Absunks $\Delta\bar{h}$ sind zur Berücksichtigung ihres Abklingverhaltens zwischen Schiff und Ufer mit den in 5.5.1.1, Bild 5.8 dargestellten Verhältniswerten zu multiplizieren, um die entsprechenden Werte am Ufer $\bar{v}_{rück,u}$ und $\Delta\bar{h}_u$ zu erhalten:

$$\Delta\bar{h}_u = \Delta\bar{h} \left\{ \frac{\Delta\bar{h}_u}{\Delta\bar{h}} \right\} \quad \text{Bild 5.8} \quad (5-26)$$

$$\bar{v}_{rück,u} = \bar{v}_{rück} \left\{ \frac{\bar{v}_{rück,u}}{\bar{v}_{rück}} \right\} \quad \text{Bild 5.8} \quad (5-27)$$

$\Delta\bar{h}$ und $\bar{v}_{rück}$ sind Bemessungswerte für die mittige Fahrt und Eingangswerte für die weiteren empirischen Ergänzungen hinsichtlich des Einflusses des Wasser-

spiegelgefälles und der exzentrischen Fahrt nach 5.5.4.2 - 5.5.4.4.

Für die eindimensionale Kanaltheorie sind zahlreiche weitere Berechnungsansätze entwickelt worden */Bouwmeester 1977; Dand, White 1978; Führböter et al. 1983; Jansen, Schiff 1953; Söhngen 1992/*. Sie liefern alle nur einen über die Primärwelle gemittelten Wert für die Wasserspiegelabsenkung $\Delta\bar{h}$.

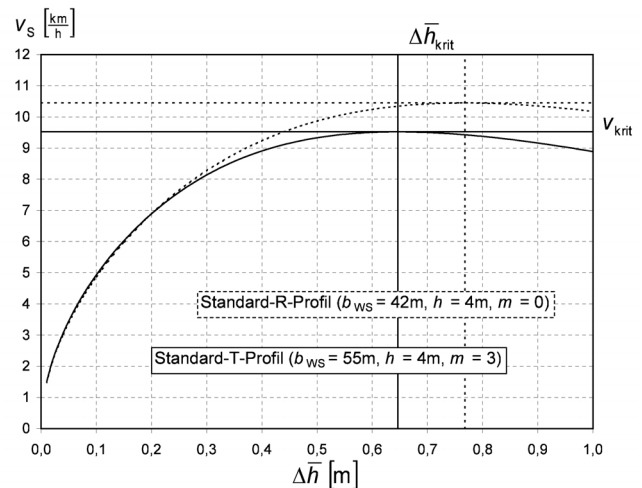


Bild 5.11 Mit Gl. (5-25) errechnete Schiffsgeschwindigkeit v_S als Funktion des mittleren Wasserspiegelabsunks $\Delta\bar{h}$ nach der 1D-Kanaltheorie für die Fahrt eines GMS ($L = 110 \text{ m}$, $B = 11,4 \text{ m}$, $T = 2,8 \text{ m}$, $\delta_{1H} = 0,19 \text{ m}$) in Standard-T- und -R-Profil

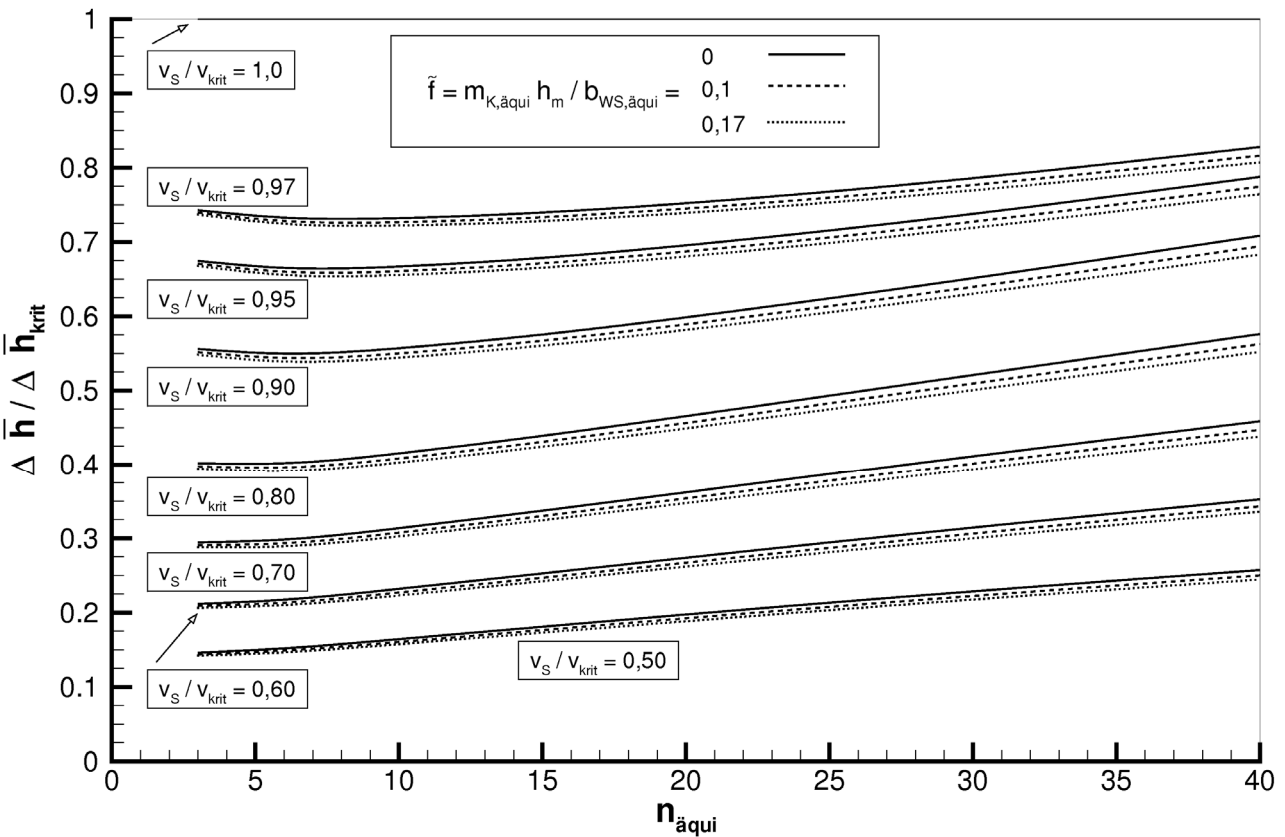
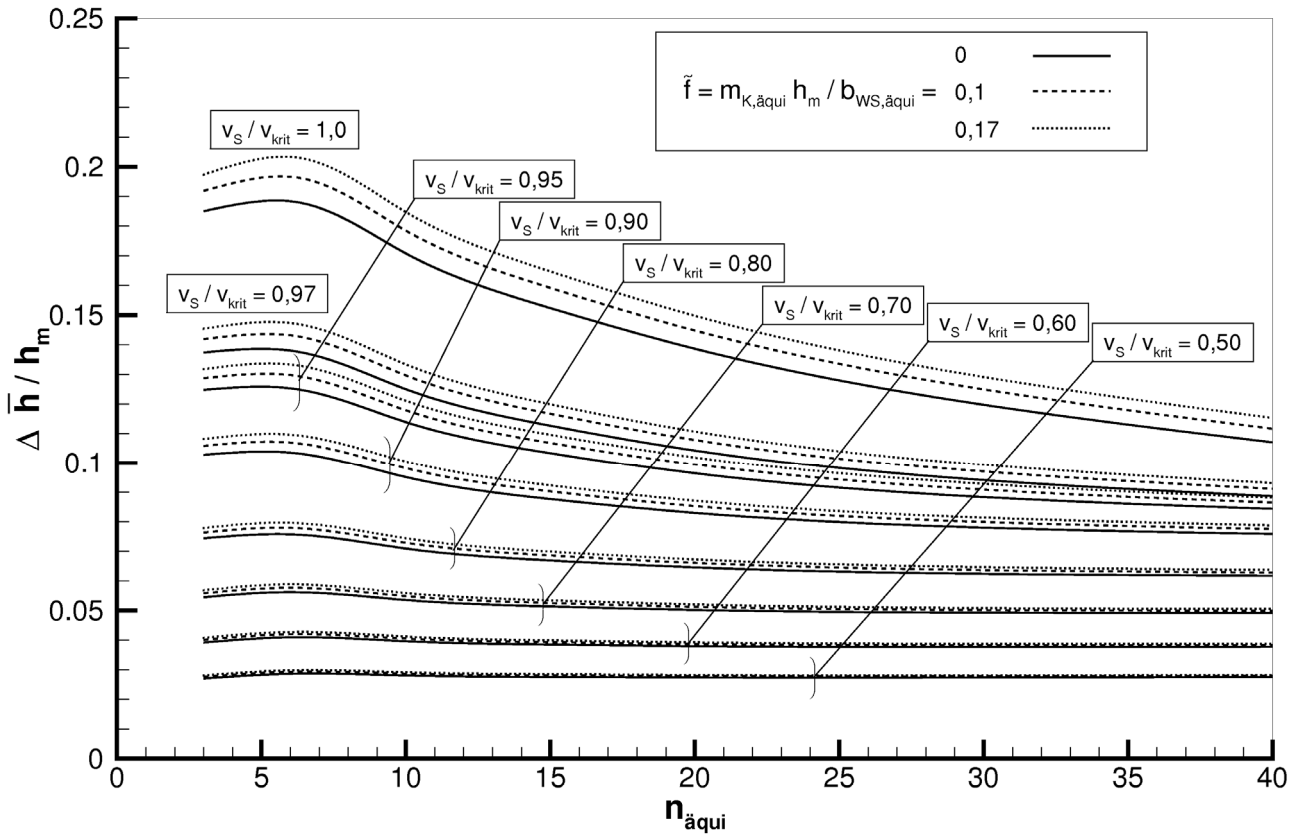


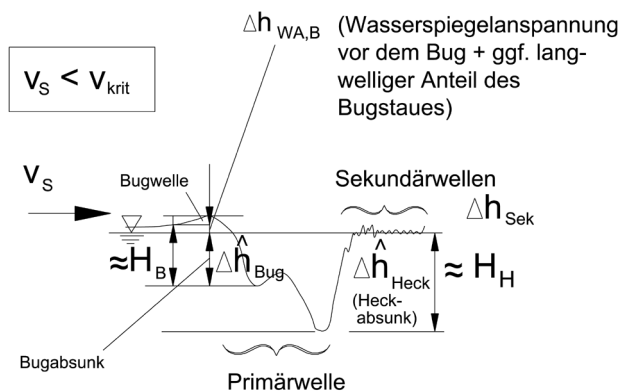
Bild 5.12 Mit der 1D - Kanalththeorie errechnete Relativwerte (bezogen auf $\Delta \bar{h}_{\text{krit}}$ und h_m) des mittleren Wasserspiegelabsunks $\Delta \bar{h}$ als Funktion von $n_{\text{äqui}}$ und des Formparameters \tilde{f} für typische relative Schiffsgeschwindigkeiten v_s / v_{krit}

5.5.4 Hydraulische Bemessungsgrößen und geotechnisch maßgebende Absinkparameter bei beliebiger Fahrposition

5.5.4.1 Definition der Wellenhöhe

Die Berechnung der Bemessungswerte der Schiffswellenhöhe H für Bug (H_B) und Heck (H_H) erfolgt entsprechend der rechnerischen Kanalbreite in der Mitte der Böschung. Veränderungen der auf der Böschung auflaufenden Welle werden nicht separat, sondern global in den Bemessungsansätzen erfasst.

Prinzipielle Verläufe der Primär- und Sekundärwellen, wie ein ortsfester Beobachter sie am Ufer wahrnehmen würde, sind in Bild 5.13 dargestellt.



$v_s \approx v_{krit}$ und $v_s \geq v_{krit}$

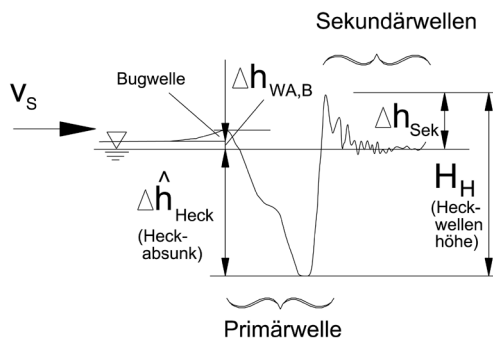


Bild 5.13 Schiffsprimärwellenbildung im unterkritischen ($v_s < v_{krit}$), kritischen ($v_s \approx v_{krit}$) und überkritischen ($v_s > v_{krit}$) Geschwindigkeitsbereich

5.5.4.2 Bugwellenhöhe und zugehörige Rückströmungsgeschwindigkeit ohne Exzentrizitätseinfluss

Zur Berechnung des maximalen Bugabsunks ist der Schiffsquerschnitt am Bug einzusetzen, ggf. unter Berücksichtigung von Grenzschicht- und Flachwasser-effekten nach 5.5.1. Für moderne GMS und Schlepper gilt folgende Gleichung /Przedwojski et al. 1995/ für die Bugwellenhöhe am Ufer, wenn kein Exzentrizitäts-

einfluss vorliegt; die Gleichung berücksichtigt u. a. die Wasserspiegelanspannung $\Delta h_{WA,B}$ vor dem Bug:

maximaler Wasserspiegelabsenk im Uferbereich am Bug $\Delta \hat{h}_{u,Bug}$ [m] ohne Exzentrizitätseinfluss

$$\Delta \hat{h}_{u,Bug} = 1,1 \Delta \bar{h}_{u,Bug} \tag{5-28}$$

mit

$\Delta \hat{h}_{u,Bug}$ maximaler Wasserspiegelabsenk im Uferbereich am Bug [m]

$\Delta \bar{h}_{u,Bug}$ mittlerer Wasserspiegelabsenk im Uferbereich am Bug [m], errechnet für die Querschnittsverhältnisse am Bug nach 5.5.3

Bemerkung: Bei fülligem Bug kann der Koeffizient auch größer als 1,1 sein.

Der Einfluss der Exzentrizität auf die Bugwelle wird in 5.5.4.4 berücksichtigt.

Die maximale Rückströmungsgeschwindigkeit im Bugbereich $\hat{v}_{rück,u,Bug}$ kann näherungsweise aus der Kontinuitätsgleichung Gl. (5-23) errechnet werden, wenn in dieser Gleichung $\Delta \bar{h}$ durch $\Delta \hat{h}_{u,Bug}$ ersetzt wird. Man beachte dabei, dass $\Delta \hat{h}_{u,Bug}$ sowohl b_m als auch ΔA beeinflusst.

5.5.4.3 Heckwellenhöhe und zugehörige Rückströmungsgeschwindigkeit ohne Exzentrizitätseinfluss

Die Veränderung des maximalen Heckabsunks gegenüber $\Delta \bar{h}_u$ (s. Gl. (5-26)) ist von folgenden Einflüssen abhängig:

- (1) Verhältnis Tiefgang zu Wassertiefe (tendenziell größeres Verhältnis $\Delta \hat{h}_{u,Heck} / \Delta \bar{h}_{u,Heck}$ bei kleinerem T/h)
- (2) Antriebsart (tendenziell größeres $\Delta \hat{h}_{u,Heck}$ bei ufernaher Fahrt bei Zweischraubern als bei Einschraubern)
- (3) Nähe zu v_{krit} (wg. des zunehmend größeren Wasserspiegelgefälles zwischen Bug und Heck und des zugehörigen hecklastigen Trimms sowie der durch die Heckquerwelle ausgelösten Sekundärwellen nach 5.5.5)
- (4) Überlagerung mit Sekundärwellen vom Bug bei kurzen Schiffen bzw. großen Kanalbreiten (Abstandsfall B in 5.5.5.1)

Die Einflüsse (1) und (3) können näherungsweise mit folgender Gleichung berücksichtigt werden /Przedwojski et al. 1995/:

maximaler Wasserspiegelabsink im Uferbereich am Heck $\Delta\hat{h}_{u,Heck}$ [m] ohne Exzentrizitätseinfluss

$$\Delta\hat{h}_{u,Heck} = C_H \Delta\bar{h}_{u,Heck} \quad (5-29)$$

mit

C_H Faktor für den Einfluss von Schiffstyp, Abladung, Vertrimmung und Wasserspiegellängsgefälle [-]

$C_H \approx 1,3$ für moderne Binnenschiffe ($T/h \approx 0,7$)

$C_H \approx 1,5$ für teilabgeladene, insbesondere ballastierte moderne Binnenschiffe und Schlepper ($T/h \approx 0,4$)

$C_H \approx 1,1$ für binnengängige Seeschiffe, da sie i. d. R. buglastig vertrimmen

$\Delta\bar{h}_{u,Heck}$ mittlerer Wasserspiegelabsink im Uferbereich [m], errechnet nach 5.5.3 für die Querschnittsverhältnisse am Heck

$\Delta\hat{h}_{u,Heck}$ maximaler Wasserspiegelabsink im Uferbereich am Heck [m]

Bei Schiffsgeschwindigkeiten im Bereich v_{krit} können zusätzliche Heckquerwellen auftreten, die in 5.5.5.3 beschrieben sind. Deren Anteil an $\Delta\hat{h}_{u,Heck}$ kann größer sein als der aus den o. g. Einflüssen (1) – (3), insbesondere im Falle des zusätzlichen Einflusses (4).

Alternativ zu Gl. (5-29) ergibt sich nach Messungen der BAW am Wesel-Datteln-Kanal /BAW 2004/ dann $\Delta\hat{h}_{u,Heck}$ aus folgender Gleichung:

$$\Delta\hat{h}_{u,Heck} \approx \Delta\bar{h} + \frac{1}{2} H_{Sek} \quad (5-30)$$

mit

H_{Sek} Höhe der zusätzlichen Sekundärwelle nach 5.5.5.3 aus Gl. (5-47) unter Beachtung von Gl. (5-50)

Im Falle des Einflusses (4) ist der unterhalb des Ruhewasserspiegels (RWS) auftretende Anteil der Sekundärwellenhöhe des Bugs aus Gl. (5-43) (s. 5.5.5.2) zu $\Delta\hat{h}_{u,Heck}$ nach Gl. (5-29) oder Gl. (5-30) zu addieren.

Die maximale Rückströmungsgeschwindigkeit im Heckbereich $\hat{v}_{rück,u,Heck}$ kann näherungsweise aus der Kontinuitätsgleichung Gl. (5-23) errechnet werden,

wenn in dieser Gleichung $\Delta\bar{h}$ durch $\Delta\hat{h}_{u,Heck}$ ersetzt wird. Man beachte dabei, dass $\Delta\hat{h}_{u,Heck}$ sowohl b_m als auch ΔA beeinflusst.

5.5.4.4 Maximalwerte von Bug- und Heckwellenhöhe bei exzentrischer Fahrt

Mit zunehmender Ufernähe steigen die Werte der Wellenhöhe an der Böschung stark an. Einer der Gründe für diesen Effekt ist die Abnahme der Wellenlänge zwischen Schiff und Ufer, die nach 6.2, Gl. (6-6) vom Uferabstand abhängig ist, weshalb sich bei konstanter Wellenenergie bei abnehmendem Uferabstand eine größere Wellenhöhe ergibt. Der Anstieg der Wellenhöhe berechnet sich nach /Przedwojski et al. 1995/ in Abhängigkeit vom Verhältnis der Querschnittsfläche zwischen Schiff und Ufer zum Kanalquerschnitt (bei Flachwasserfahrt zur äquivalenten Kanalquerschnittsfläche nach 5.5.1) für das schiffsnähere Ufer wie folgt (s. Bild 5.14):

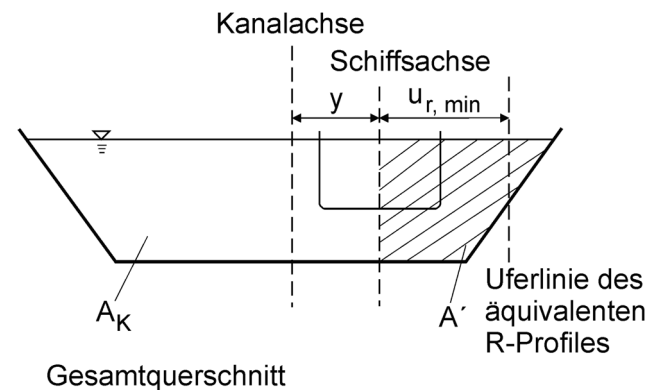


Bild 5.14 Definition von A' bei exzentrischer Fahrt im Breitenfall A nach 5.5.1.1

Maximalwert der Bugwellenhöhe $H_{u,Bug}$ [m] am schiffsnäheren Ufer bei exzentrischer Fahrt

$$H_{u,Bug} = (2,0 - 2 \frac{A'}{A}) \Delta\hat{h}_{u,Bug} \quad (5-31)$$

Maximalwert der Heckwellenhöhe $H_{u,Heck}$ [m] am schiffsnäheren Ufer bei exzentrischer Fahrt

$$H_{u,Heck} = (2,0 - 2 \frac{A'}{A}) \Delta\hat{h}_{u,Heck} \quad (5-32)$$

mit

A maßgebende Querschnittsfläche des Kanals [m²]

A' Querschnittsfläche zwischen Schiffsachse und Ufer [m²] (s. Bild 5.14)

A'/A Querschnittsverhältnis [-] entsprechend den Fallunterscheidungen in 5.5.1.1 und Bild 5.5

Breitenfall A: $\frac{A'}{A} = \frac{u_{r,\min}}{b_r} \geq 0$

Breitenfall B: $\frac{A'}{A} = 0,5$

Breitenfall C: $\frac{A'}{A} = \frac{u_{r,\min}}{\frac{b_E}{2} + u_{r,\min}} \geq 0$

$\Delta\hat{h}_{u,\text{Bug}}$ maximaler Wasserspiegelabsink im Uferbereich am Bug [m] nach 5.5.4.2

$\Delta\hat{h}_{u,\text{Heck}}$ maximaler Wasserspiegelabsink im Uferbereich am Heck [m] nach 5.5.4.3

Bei extrem ufernaher Fahrt kann der Auftreffpunkt der Interferenzschrägwellen des Bugsekundärwellensystems mit dem Maximum des Bugabsunks, das im Bereich des beginnenden Hauptspants auftritt, zusammenfallen. Zur Bugwellenhöhe ist dann näherungsweise die halbe Sekundärwellenhöhe zu addieren (Sondersituation von Abstandsfall A in 5.5.5.1).

Am schiffsferneren Ufer kann für Bemessungszwecke $H_{u,\text{Bug}} = \Delta\hat{h}_{u,\text{Bug}}$ und $H_{u,\text{Heck}} = \Delta\hat{h}_{u,\text{Heck}}$ gesetzt werden.

Der Einfluss der Ufernähe auf die Rückströmungsgeschwindigkeit ist gering und wird vernachlässigt. Die Bemessungswerte ergeben sich somit direkt nach 5.5.4.2 und 5.5.4.3

5.5.4.5 Wiederauffüllungsströmung

In brechenden Heckwellen, aber auch bei ungebrochenen hohen Heckwellen sowie bei ufernaher Fahrt tritt eine uferparallele Wiederauffüllungsströmung an der Böschung auf. Sie ist als mitlaufende schäumende Zunge am Ufer erkennbar (Bild 5.15).

Die Fließgeschwindigkeit u_{\max} , die in Höhe der Deckwerkssteine auftritt, erreicht bei sehr großen Wellenhöhen die Schiffsgeschwindigkeit. Für kleinere Wellenhöhen ist sie maßgeblich vom Verhältnis der Schiffsgeschwindigkeit zur Wellenfortschrittsgeschwindigkeit der brechenden Welle (errechnet mit Wassertiefe \approx Wellenhöhe) abhängig (Kennzahl \tilde{Fr}). Aus Messdaten der BAW am Wesel-Datteln-Kanal /BAW 2004/ konnte folgende Näherungsgleichung für u_{\max} abgeleitet werden:

maximale Geschwindigkeit der Wiederauffüllungsströmung u_{\max} [m/s]

$$\left. \begin{array}{l} u_{\max} \approx 0,3 v_s \quad \text{für } \tilde{Fr}^2 > 1,83 \\ u_{\max} \approx 0,3 v_s + 0,7 \left(1 - \frac{\tilde{Fr}^2 - 0,71}{1,12} \right) v_s \quad \text{für } 0,71 \leq \tilde{Fr}^2 \leq 1,83 \\ u_{\max} \approx 1,0 v_s \quad \text{für } \tilde{Fr}^2 < 0,71 \end{array} \right\} (5-33)$$

mit

\tilde{Fr} Froude-Zahl am Ort der maximalen Heckwellenhöhe [m]

$$\tilde{Fr}^2 = \frac{v_s^2}{g H_{u,\text{Heck}}}$$

$H_{u,\text{Heck}}$ maximale Heckwellenhöhe [m] nach 5.5.4.4, Gl. (5-32) (Bemessungswellenhöhe)

v_s Schiffsgeschwindigkeit [m/s]

u_{\max} maximale Geschwindigkeit der Wiederauffüllungsströmung in Höhe der Deckwerksteine [m/s]

Ein Ansatz, der die Rauheit der Böschungssicherung berücksichtigt, ist von /Verhey, Bogaerts 1989/, angegeben worden.

Neben der Kennzahl \tilde{Fr} sind die örtliche Froude-Zahl und das Verhältnis der Wellenhöhe $H_{u,\text{Heck}}$ zur Wellenlänge L_H bzw. hier zum Uferabstand u_{eff} (Zusammenhang nach Gl. (6-6) in 6.2) bestimmend dafür, ob eine signifikante Wiederauffüllungsströmung auftritt oder nicht. Aus Fahrversuchen im WDK /BAW 2004/ können die im Bild 5.16 angegebenen Bereiche unterschieden werden (Brecherkriterium). Zur Bildung der Froude-Zahl sind dabei die Maximalwerte der Rückströmungsgeschwindigkeit und der Wellenhöhe am Heck nach 5.5.4.3 und 5.5.4.4 einzusetzen.

Die vorgenannten Gleichungen und das Brecherkriterium können nur eine erste grobe Einschätzung liefern. Sie zeigen aber, dass die Wellen insbesondere bei ufernaher Fahrt brechen bzw. eine starke Wiederauffüllungsströmung auftritt.

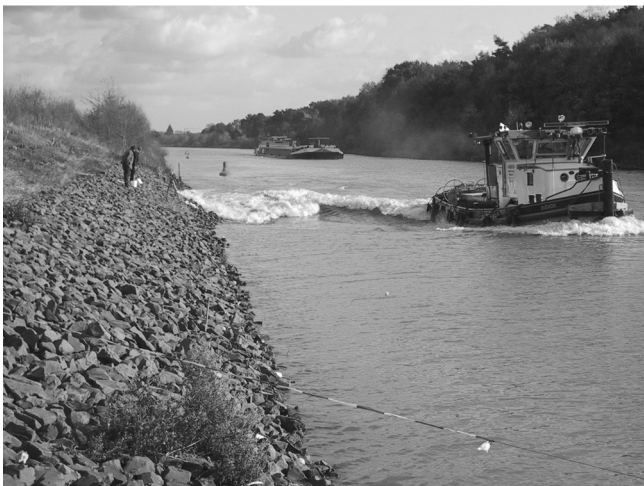
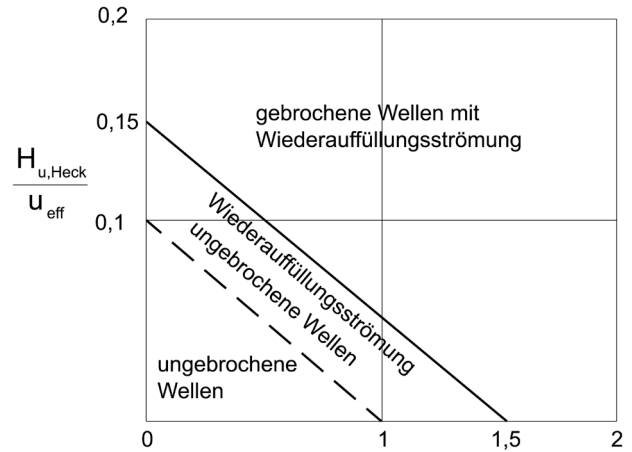


Bild 5.15 Wiederauffüllungsströmung an der Böschung bei ufernaher Fahrt eines abgeladenen (oben) und leeren (Mitte) Großmotorgüterschiffes sowie eines Schleppers (unten) im Standard-T-Profil



$$Fr^2 = \frac{(v_s + \hat{v}_{rück, u, Heck})^2}{g (h_m - H_{u, Heck})}$$

h_m mittlere Wassertiefe [m]

$H_{u, Heck}$ maximale Heckwellenhöhe ohne Sekundärwellenhöhenanteil [m]

u_{eff} effektiver Uferabstand nach Bild 5.19

$\hat{v}_{rück, u, Heck}$ maximale Rückströmungsgeschwindigkeit [m/s] am Ufer im Heckbereich

v_s Schiffsgeschwindigkeit [m/s]

Fr Froude - Zahl im Heckbereich [-]

Bild 5.16 Abgrenzung zwischen unebrochenen Wellen, Wellen mit signifikanter Wiederauffüllungsströmung und vollständig gebrochenen Wellen bei der ufernahen Fahrt an Böschungen (Brecherkriterium)

5.5.4.6 Vergrößerung der Wellenhöhen bei Fahrt mit Driftwinkel

Schon bei Fahrt auf **gerader Strecke** tritt nautisch bedingt ein Driftwinkel β_D zwischen Schiffs- und Kanalachse auf, der nach *IBMV 1994* mit ca. $2,1^\circ$ (GMS) bzw. ca. $1,25^\circ$ (185 m SV) anzusetzen ist (s. Bild 5.17a).

Bei **Kurvenfahrten** ist der Driftwinkel β_D wesentlich größer (s. Bild 5.17b). Er kann gemäß Bild 5.17b aus der relativen Lage des taktischen Drehpunktes (c_F -Wert: fahrdynamische Konstante) errechnet werden. Im Stillwasser gilt nach *Dettmann 1998* $c_F \approx 0,9$ für SV und $c_F \approx 1,0$ für GMS. Zur Berücksichtigung des Strömungseinflusses wird auf *Dettmann, Jurisch 2001* verwiesen.

Dieser Driftwinkel einfluss wird durch die Definition des "fiktiv" vergrößerten eingetauchten Hauptspantquerschnitts $A_{S,eff,D}$ berücksichtigt (Grenzschichteffekte vernachlässigt):

Schiffsquerschnitt $A_{S,eff,D}$ bei Fahrt mit Drift [m²]

$$A_{S,eff,D} = \frac{(B + 0,25 L \sin \beta_D)}{B} A_M \quad (5-34)$$

mit

A_M eingetauchte Schiffsquerschnittsfläche am Hauptspant [m²] (Grenzschicht hier vernachlässigt)

B Schiffsbreite [m]

L Schiffslänge [m]

β_D Driftwinkel [°]

Die Veränderung der Böschungsbelastung bei Fahrt mit Driftwinkel wird über $A_{S,eff,D}$ (anstelle $A_{S,eff}$ nach 5.5.1) und die ggf. größere Schiffsexzentrizität (maßgebend ist die Lage des Schiffshecks) in die Dimensionierung eingeführt (wg. $A_{S,eff,D} > A_M$). Der Einfluss des Driftwinkels auf die hydraulischen Bemessungsgrößen ist bei Einzelfahrern gering und erst bei langen Schubverbänden relevant. Da nicht von vornherein entschieden werden kann, ob die Fahrt mit oder ohne Drift bemessungsrelevant ist, müssen ggf. beide Fälle untersucht werden.

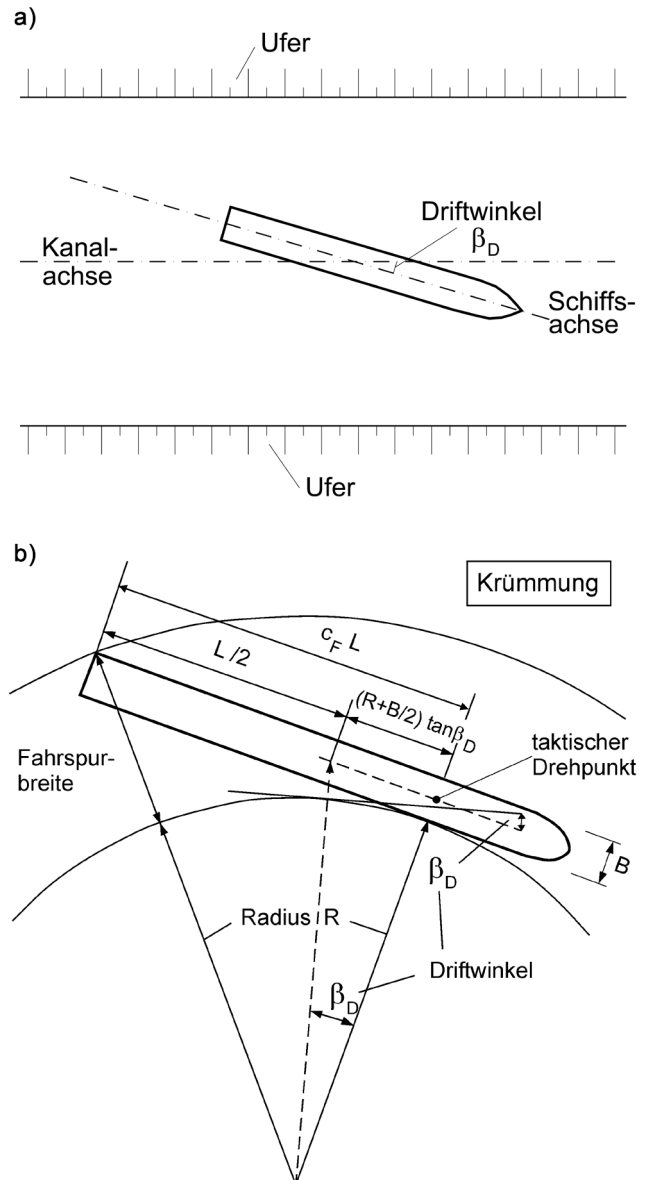


Bild 5.17 Prinzipische Skizze zur Erfassung des Driftwinkelverhaltens auf gerader Strecke (a) und bei Kurvenfahrt (b)

5.5.4.7 Absunkgeschwindigkeit von Schiffswellen

Das passierende Schiff bewirkt durch die lokal und temporär geänderten Querschnittsverhältnisse eine Umströmung mit Bugstau, Absunk und Heckwelle. Für geotechnische Fragestellungen (s. 5.10.3) ist die Kenntnis der größten (vom aktuellen Wasserspiegel vor dem Schiff ohne Bugwellenhöhe und vom durch das Schiff angespannten Wasserspiegel) Wellenhöhen $H_{u,Bug}$ bzw. $H_{u,H}^*$ am Ufer, der zugehörigen Absunkzeit t_a und damit der Absunkgeschwindigkeit \bar{v}_{za} erforderlich.

Für überschlägliche Berechnungen werden folgende Bemessungswerte empfohlen, die aus Messungen

des Wellensystems am Bug /BAW 2004/ abgeleitet wurden (s. Bild 5.18):

Durchschnittliche Absunkgeschwindigkeit am Bug
 $\bar{v}_{za,B}$ [m/s]

$$\bar{v}_{za,B} = 0,12 \text{ m/s} \quad (5-35)$$

Zugehörige Absunkzeit $t_{a,B}$ [s]

$$t_{a,B} = 5 \text{ s} \quad (5-36)$$

Diese Werte gelten für ein böschungsnah mit kritischer Schiffsgeschwindigkeit (Bordwand über Böschungsfuß) fahrendes Schiff mit fülliger Form.

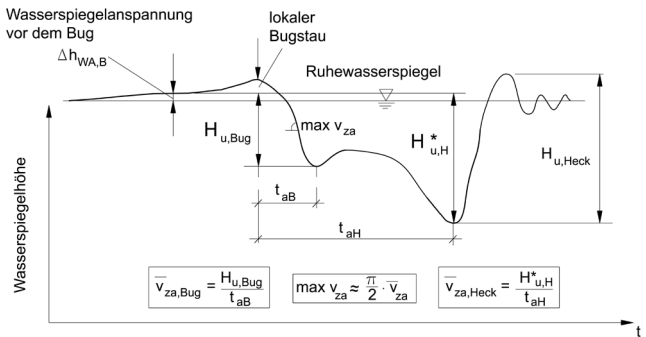


Bild 5.18 Prinzipieller Zusammenhang zwischen Wellenhöhe $H_{u,Bug}$ bzw. $H_{u,H}^*$ (entspricht Absunk z_a bei geotechnischen Berechnungen) und Absunkzeit t_a

Für davon abweichende Verhältnisse kann für kleine Uferabstände folgende Näherungsgleichung für die Zeit $t_{a,B}$ des maximalen Bugabsunks (inklusive Wasserspiegelanspannung vor dem Bug: $H_{u,Bug}$ nach Bild 5.18 \approx Bugwellenhöhe nach 5.5.4.4, Gl. (5-31)) verwendet werden:

$$t_{a,B} \approx C \frac{u_{eff}}{v_{SüG}} \quad (5-37)$$

- mit
- C Konstante [-]
 C = 1,7 für moderne GMS
 C = 1,5 für Schlepper
 C = 1,3 für ältere Schiffe mit fülliger Form

$t_{a,B}$ Absunkzeit am Bug [s] (s. Bild 5.18)

u_{eff} effektiver Uferabstand [m] (Abstand Schiffsachse - rechnerische Uferlinie bei RWS nach Bild 5.19)

Beachte: die rechnerische Uferlinie liegt auf der Mitte der uferseitig vom Schiff verbleibenden restlichen Böschung

$v_{SüG}$ Schiffsgeschwindigkeit über Grund [m/s], die nach Gl. (5-20) mit der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser v_S und der Strömungsgeschwindigkeit v_{Str} verknüpft ist

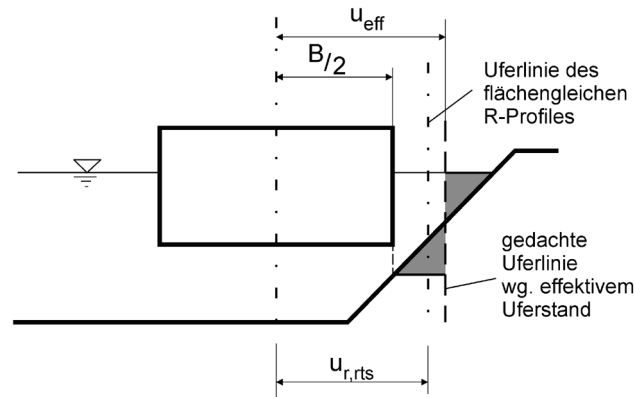


Bild 5.19 Definition des effektiven Uferabstands u_{eff} (Abstand Schiffsachse - rechnerische Uferlinie) im symmetrischen Trapez-Profil

Für den effektiven Uferabstand gelten im symmetrischen Trapezprofil je nach Fahrposition die folgenden Formeln (Definitionen vgl. Bild 5.19):

- Schiff überschreitet Böschungsfußpunkt:

$$u_{r,rts} < \frac{B}{2} + \frac{mh}{2}$$

$$u_{eff} = \frac{u_{r,rts}}{2} + \frac{mh}{4} + \frac{B}{4}$$

Beachte: das Schiff darf mit der Kimmlinie die Böschung nicht überschreiten

- Schiff fährt außerhalb der Böschung:

$$u_{r,rts} \geq \frac{B}{2} + \frac{mh}{2}$$

$$u_{eff} = u_{r,rts}$$

Die Absunkzeit kann auch bei extrem ufernaher Fahrt nicht beliebig klein werden, da in diesem Fall das Sekundärwellensystem begrenzend ist.

Für $v_S / \sqrt{gh_m} < 0,8$ gilt für die kleinstmögliche Absunkzeit:

$$t_{a,B} \geq t_{a,B,Sek} \quad (5-38)$$

mit

$t_{a,B}$ Absunkzeit am Bug allgemein [s]

$t_{a,B,Sek}$ Absunkzeit der Sekundärwelle am Bug [s] nach Gl. (5-39)

Die Absinkzeit der Sekundärwellen am Bug berechnet sich wie folgt:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{a,B,Sek} = \pi \frac{v_S^2}{g v_{SüG}} \text{ für Querwellen} \\ t_{a,B,Sek} = \frac{2}{3} \pi \frac{v_S^2}{g v_{SüG}} \text{ für Schrägwellen} \end{array} \right\} \quad (5-39)$$

Die Werte nach Gl. (5-39) sind auch im Sonderfall Sekundärwellenbelastung anzusetzen.

Bei hecklastig vorgetrimmten Schiffen, zum Beispiel bei Leerfahrt (Ballastfahrt) und bei schnelleren kleinen Fahrzeugen, bei einem Schlepper oder einem Sportboot, dominiert das Heckwellensystem. Für die bodenmechanischen Nachweise kann in diesem Fall der Wasserspiegelabsenk zwischen Bug und Heck bzw. die zugehörige maßgebende Wellenhöhe $H_{u,H}^*$ nach Bild 5.18, zusammen mit der zugehörigen Absinkzeit $t_{a,H}$ maßgebend werden. Für $t_{a,H}$ gilt

$$t_{a,H} \approx t_{a,B} + \frac{L_{pris}}{v_{SüG}} \quad (5-40)$$

mit

L_{pris} Länge des Fahrzeugbereiches mit weitgehend prismatischem Querschnitt [m]

$L_{pris} \approx 0,9 L$	2-gliedriger Schubverband
$L_{pris} \approx 0,8 L$	GMS, ES
$L_{pris} \approx 0,3 L$	Sportboot mit Spiegelheck
$L_{pris} \approx 0,0 L$	Schlepper

und für $H_{u,H}^*$ gilt

$$H_{u,H}^* \approx 0,1 H_{u,Bug} + H_{u,Heck} - \frac{1}{2} H_{Sek,q} \quad (5-41)$$

mit

$H_{u,H}^*$	maßgebende Wellenhöhe im Uferbereich am Heck [m] zur Berechnung der Absinkzeit
$H_{u,Bug}$	Maximalwert der Bugwellenhöhe am Ufer bei exzentrischer Fahrt [m] nach Gl. (5-31)
$H_{u,Heck}$	Maximalwert der Heckwellenhöhe am Ufer bei exzentrischer Fahrt [m] nach Gl. (5-32)
$H_{Sek,q}$	Sekundärwellenhöhe reiner Heckquerwellen [m] nach Gl. (5-47)

Die durchschnittliche Absinkgeschwindigkeit \bar{v}_{za} ergibt sich aus dem Quotienten von maßgebender Wellenhöhe und zugehöriger Absinkzeit.

5.5.5 Sekundärwellen

5.5.5.1 Allgemeines

Ausgehend von Bug und Heck werden von einem fahrenden Schiff Schräg- und Querwellen ausgelöst (Bild 5.20). Sie bilden das Sekundärwellensystem. Die Wellen überlagern sich und bilden markante Interferenzlinien aus, an denen die größten Wellenhöhen auftreten.

Für Froudesche Tiefenzahlen $Fr_h = v_S / \sqrt{gh}$ bis 0,7, in grober Näherung auch bis 0,8, ist die Interferenzlinie mit dem Kelvinschen Winkel α_K von ca. 19° gegen die Schiffsachse geneigt. Die Fronten der Schrägwellen sind um $\beta \approx 55^\circ$ gegenüber der Schiffsachse geneigt und damit β auch gegenüber dem Kanalufer, wenn annähernd uferparallel gefahren wird. Wird nicht uferparallel gefahren, so ist ein veränderter Auftreffwinkel der Schrägwellen in den folgenden Gleichungen zu berücksichtigen.

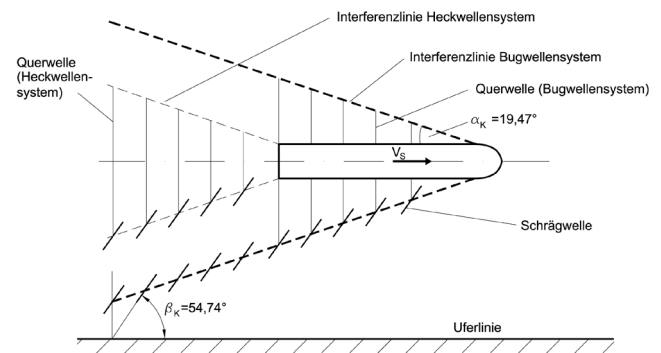


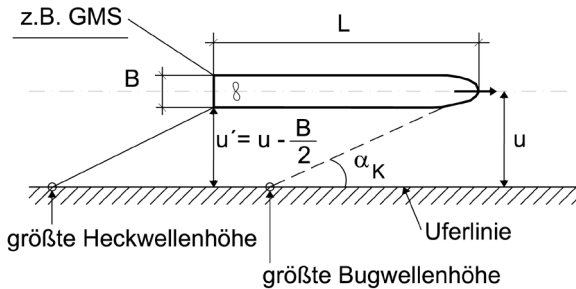
Bild 5.20 Sekundärwellensystem für $Fr_h \leq 0,8$

Die Sekundärwellen breiten sich zum Ufer hin aus und nehmen dabei in der Höhe ab. Querwellen nehmen stärker ab als Schrägwellen. Da die Querwellen des Heckwellensystems insbesondere bei kurzen, schnellen Schiffen und bei Leerfahrern stärker ausgebildet sind als die des Bugwellensystems, die Bug-schrägwellen jedoch stärker als die Heckschrägwellen, sind i. d. R. die drei im Folgenden beschriebenen Bemessungsfälle zu beachten (s. Bild 5.21).

Bei der Ermittlung von u bzw. u' ist bei großen $\Delta \bar{h}$ ggf. der durch das Rückströmungsfeld abgesenkte Wasserspiegel zu beachten. u und u' reduzieren sich in dem Fall in etwa um $m \Delta \bar{h}_u$ ($\Delta \bar{h}_u$ nach Gl. (5-26) in 5.5.3).

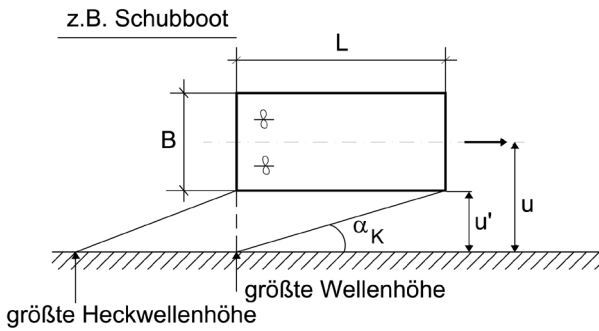
Abstandsfall A

Bug- oder Hecksekundärwellen treffen auf das Ufer; keine Überlagerung mit Primärwellensystem



Abstandsfall B

Interferenzlinie des Bugsekundärwellensystems überlagert sich mit der Heckquerwelle des Primärwellensystems



Abstandsfall C

Bugquerwelle überlagert sich mit der Heckquerwelle

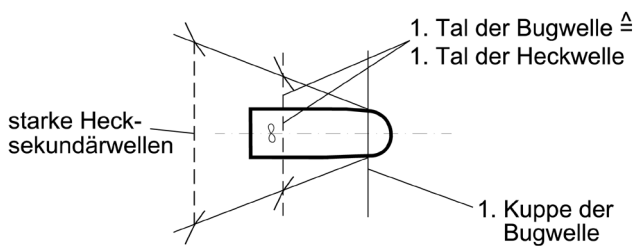


Bild 5.21 Standardabstandsfälle bei Sekundärwellen

Abstandsfall A

Für $u' < L \tan \alpha_K$, also lange Schiffe im Verhältnis zur Kanalbreite bzw. für kleine Uferabstände (Standard-situation für ES, GMS und SV in Kanälen), tritt i. d. R. keine bemessungsrelevante Überlagerung von Primär- und Sekundärwellensystemen auf. Die Sekundärwellenhöhen ergeben sich nach 5.5.5.2. Die Bemessung der erforderlichen Steingröße der Uferbefestigung kann dann getrennt für Primär- und Sekundärwellenfeld erfolgen (vgl. 6.2 und 6.4).

Abstandsfall B

In breiten Kanälen oder bei kurzen Fahrzeugen kann es zu Überlagerungen der Heckquerwelle des Primärwellensystems mit den Interferenzen der Bug-Sekundärwellen kommen. Dies ist etwa bei $u' = L \tan \alpha_K$ der Fall. Die für die Ermittlung der erforderlichen Steingröße maßgebende Wellenhöhe am Heck ergibt sich dann aus der Überlagerung von Bug-Sekundärwelle nach 5.5.5.2 und Heckquerwelle des Primärwellensystems nach 5.5.4.4. Da die Wellenlängen von Primär- und Sekundärwellensystem unterschiedlich sind, werden bei deren Überlagerung die ganze Primärwellenhöhe und die halbe Sekundärwellenhöhe angesetzt.

Die Überlagerungswellen sind besonders hoch bei fülligen oder stumpfen Bugformen, d. h. bei einzeln fahrenden Schubbooten, und wenn das Fahrzeug im Bereich der kritischen Schiffsgeschwindigkeit fährt. Für einzeln fahrende Schubboote aber auch für große Sportboote muss deshalb ggf. die Schiffsgeschwindigkeit begrenzt werden, um die im Regelfall zwar seltenen, aber sehr großen Wellenbelastungen der Ufer zu vermeiden.

Abstandsfall C

Stark motorisierte kurze Boote, zum Beispiel Sportboote, können auch im allseits beschränkten Fahrwasser die Gleitgeschwindigkeit erreichen und überschreiten. Der hinsichtlich der Wellenentwicklung ungünstigste Fall, der mit einem Maximalwert des Leistungsbedarfs zusammenfällt, tritt bei Erreichen der Gleitgeschwindigkeit auf. Dies ist dann der Fall, wenn die wellenbildende Schiffslänge L_W der halben Sekundärwellenlänge entspricht. Der Bug liegt dabei auf der Höhe des ersten Wellenbergs des Bugwellensystems, das Heck liegt im Tal dieser Bugwelle und gleichzeitig im Tal des Heck-Sekundärwellensystems. Das Schiff muss quasi im eigenen Sekundärwellensystem bergauf fahren. Dieser Sonderfall wird in 5.5.5.2, Gl. (5-47) und zusätzlich in 5.5.5.4 behandelt. Es gilt:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_q = 2 L_W \\ L_W \approx \beta_\lambda L \\ \lambda_q \approx 2\pi \frac{v_s^2}{g} \end{array} \right. \quad (5-42)$$

mit

- L Schiffslänge [m]
- L_W wellenbildende Schiffslänge [m] (entspricht Länge in Höhe der Wasserlinie)
- v_s Schiffsgeschwindigkeit [m/s]

β_λ Beiwert zur wellenbildenden Schiffslänge [-]
 $\beta_\lambda \approx 0,72$ für schnelle Schiffe, nach /Horn 1928/
 $\beta_\lambda \approx 0,90$ für gängige Binnenschiffe und Schubverbände

λ_q Wellenlänge der Querwellen [m]

Mit (5-42) kann für eine vorgegebene Schiffslänge z. B. die Schiffsgeschwindigkeit errechnet werden, bei der ein Schiff, für das Abstandsfall C zutrifft, ins Gleiten kommt.

Eine signifikante Überlagerung von Bug- und Heckquerwellen setzt schon bei $\lambda_q > 4/3 L_W$ ein.

5.5.5.2 Berechnung der Sekundärwellenhöhen

Für die Interferenzpunkte der Bug- und Heck-schrägwellen gilt nach /Blaauw et al. 1984/ bzw. /Gates, Herbrich 1977/:

Sekundärwellenhöhe H_{Sek} [m] auf der Interferenzlinie von Bug- und Heckschrägwellen

$$H_{\text{Sek}} = A_W \frac{v_s^{8/3}}{g^{4/3} (u')^{1/3}} f_{\text{cr}} \quad (5-43)$$

mit

A_W Wellenhöhenbeiwert [-] abhängig von Schiffsforn, Schiffsabmessungen, Abladetiefe und Wassertiefe

Für Überschlagsrechnungen kann angesetzt werden:

$A_W \approx 0,25$ für konventionelle Binnenschiffe und Schlepper

$A_W \approx 0,35$ für leere, einspurige Schubverbände

$A_W \approx 0,80$ für vollbeladene, mehrspurige Schubverbände

f_{cr} Geschwindigkeitsbeiwert [-] nach Gl. (5-44)

g Erdbeschleunigung [m/s^2]

H_{Sek} Sekundärwellenhöhe [m]

u' Abstand Schiffswand - Uferlinie [m]
 $u' = u - B/2$ (vgl. Bild 5.21)

Der Geschwindigkeitsbeiwert f_{cr} in Gl. (5-43) berücksichtigt, dass die Sekundärwellenhöhen im Bereich der kritischen Schiffsgeschwindigkeit anwachsen. In Analogie zum Anstieg des Schiffswiderstands beim Erreichen der Stauwellengeschwindigkeiten gilt näherungsweise:

$$\left. \begin{aligned} f_{\text{cr}} &\approx 1,0 \quad \text{für } v_s/v_{\text{krit}} < 0,8 \\ f_{\text{cr}} &\approx 1,0 + 0,7 \left\{ \sin \left[\frac{2\pi}{0,8} \left(\frac{v_s}{v_{\text{krit}}} - 0,8 \right) \right] \right\}^2 \\ &\quad \text{für } 0,8 \leq v_s/v_{\text{krit}} \leq 1,2 \end{aligned} \right\} \quad (5-44)$$

Beachte: $\sin(\text{Bogenmaß})$

Die Gl. (5-43) gilt streng genommen nur für solche Uferabstände u' , bei denen die Sekundärwellenhöhen am Ufer interferieren. Wegen zufälliger Unregelmäßigkeiten des Schiffspfades und der Sekundärwellen kann sie für Bemessungszwecke allgemein angewendet werden, wenn folgende Einschränkung beachtet wird:

$$u' \geq \frac{1}{2} \lambda_q \tan \alpha_K \quad (5-45)$$

mit

α_K Kelvinscher Winkel [$^\circ$]

λ_q Wellenlänge der Heckquerwelle [m]

$$\lambda_q \approx 2\pi (v_s^2/g)$$

Die Wellenlänge der Schrägwellen ergibt sich für $v_s/\sqrt{gh} < 0,8$ zu

$$\lambda_s = \frac{2}{3} \lambda_q \quad (5-46)$$

mit

λ_s Wellenlänge der Schrägwelle [m]

λ_q Wellenlänge der Heckquerwelle [m]

$$\lambda_q \approx 2\pi (v_s^2/g)$$

Für reine Heckquerwellen gilt:

Sekundärwellenhöhe $H_{\text{Sek,q}}$ [m] reiner Heckquerwellen

$$H_{\text{Sek,q}} = A_W \frac{v_s^2}{g} \left(\frac{B}{2u} \right)^{1/2} (f_{\text{cr}} + f_\lambda) \quad (5-47)$$

mit

A_W Wellenhöhenbeiwert [-] nach Gl. (5-43)

B Schiffsbreite [m]

f_{cr} Geschwindigkeitsbeiwert [-] (s. Gl. (5-44))

- f_λ Wellenlängenbeiwert [-] (s. Gl. (5-48))
- u Abstand zwischen Schiffsachse und Uferlinie [m] (vgl. Bild 5.19 bzw. Bild 5.21)
- v_s Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser [m/s]

Mit dem Wellenlängenbeiwert f_λ wird die Überlagerung der Heckquerwellen mit der Bugquerwelle erfasst. Es gilt:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_\lambda \approx 0 \quad \text{für } \lambda_q \leq \frac{4}{3} L_W \\ f_\lambda = 0,9 \sin \left\{ \pi \left(\frac{2 L_W}{\lambda_q} - \frac{1}{2} \right) \right\} \\ \text{für } \frac{4}{3} L_W \leq \lambda_q \leq 2 L_W \end{array} \right\} \quad (5-48)$$

Beachte: sin(Bogenmaß)

Da die Sekundärwellen beim Überschreiten einer bestimmten Steilheit brechen, gilt für die nach Gln. (5-43) und (5-47) vorher bestimmten Sekundärwellenhöhen folgende Beschränkung:

$$H_{\text{Sek}} \text{ bzw. } H_{\text{Sek,q}} \leq \lambda_{\text{Sek}} / 2\pi \quad (5-49)$$

Die Gln. (5-43), (5-47) und (5-49) bilden die Grundlage für die weiteren Berechnungen in Kap. 6. Sie geben die Wellenhöhen an, die noch nicht durch die Uferböschung beeinflusst sind (Wellenhöhe in „Ufernähe“).

Beim Annähern an das Ufer verformen sich die Sekundärwellen durch die abnehmende Wassertiefe. Dieses Verhalten ist äußerst komplex. Vereinfachend wird der Einfluss des Ufers für die hier betrachteten Böschungsneigungen zwischen ca. 1:2 und 1:5 indirekt berücksichtigt, indem bei der Ableitung der Bemessungsformeln, zum Beispiel für die erforderlichen Steingrößen, von der Wellenhöhe in „Ufernähe“ ausgegangen wurde.

5.5.5.3 Zusätzliche Sekundärwellen in Analogie zum unvollkommenen Wechselsprung

Schon vor Erreichen der kritischen Schiffsgeschwindigkeit wird in Schiffsnähe eine Froude-Zahl von 1,0 erreicht, die mit den Maximalwerten der örtlichen Rückströmungsgeschwindigkeit und des Wasserspiegelsabsunkes gebildet wird. Hinter dem Schiff ist die Froude-Zahl kleiner als 1, wodurch ein Fließwechsel auftritt. Dieser ist erst bei höheren Schiffsgeschwindigkeiten und damit höheren Froude-Zahlen mit einer stabilen Wechselsprungwalze, der brechenden Heckquerwelle, verbunden. Im angesprochenen Geschwin-

digkeitsbereich können jedoch zusätzlich starke Heckquerwellen wie bei einem unvollkommenen Wechselsprung auftreten (s. Bild 5.22). Ihre Querausbreitung entspricht der Heckquerwelle. In erster Näherung kann ihre Höhe, die mit der Heckquerwelle des Primärwellensystems nach 5.5.4.4 interferiert, aus Gl. (5-47) für die Sekundärquerwellen errechnet werden.

Die Höhe dieser Wellen ist aus energetischen Gründen und wegen des Brechens bei großen Steilheiten zusätzlich wie folgt begrenzt:

$$H_{\text{Sek}} \leq \frac{v_s^2}{g} \quad (5-50)$$



Bild 5.22 Fahrt des MS Concordia am Main-Donau-Kanal (Kriegenbrunner Messungen) im Bereich der kritischen Schiffsgeschwindigkeit ($v_s = 12 \text{ km/h}$) /Schäle, Mollus 1971/

5.5.5.4 Sekundärwellen kleiner Boote bei Gleitgeschwindigkeit und ufernaher Fahrt

Nach /Przedwojski et al. 1995/ kann die Gleitgeschwindigkeit $v_{s,gl}$ kleiner Sportboote, die für das Gleiten vorgesehen sind, wie folgt abgeschätzt werden:

$$v_{s,gl} = 0,37 \sqrt{g L} \quad (5-51)$$

mit

L Länge des Sportboots [m]

$v_{s,gl}$ Gleitgeschwindigkeit [m/s]

Bei Fahrt mit $v_s = v_{s,gl}$ beträgt die größte Wellenhöhe an den Interferenzpunkten der Schrägwellen des Heckwellensystems:

$$H_{\text{Sek,gl}} \approx 1,4 T \left(\frac{L}{u} \right)^{1/3} \quad (5-52)$$

mit

$H_{\text{Sek,gl}}$ Sekundärwellenhöhe bei Fahrt mit Gleitgeschwindigkeit [m]

T Tiefgang des Sportboots [m]

u Uferabstand [m]

Die größte Wellenhöhe tritt im Uferabstand u^* auf, bei dem die erste Interferenzwellengruppe auf das Ufer trifft:

$$u^* \approx 0,5 B + 0,4 L \quad (5-53)$$

Um die damit verbundenen großen Wellenhöhen zu vermeiden, kann die zulässige Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser bei Vorgabe einer tolerierten Wellenhöhe näherungsweise wie folgt abgeschätzt werden:

$$v_{\text{S,zul}} = v_{\text{S,gl}} \sqrt{\frac{H_{\text{tol}}}{H_{\text{Sek,gl}}}} \quad (5-54)$$

mit

H_{tol} tolerierte Wellenhöhe [m]

$v_{\text{S,zul}}$ zulässige Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser [m/s]

5.5.6 Begegnung und Überholung

Eine häufig auftretende Fahrsituation ist die **Begegnung** zweier Schiffe. Normalerweise werden sie mit reduzierter Geschwindigkeit aufeinander zufahren, um dann im Bereich der letzten Schiffsdrittel wieder zu beschleunigen, damit es nicht zur Heckberührung kommt. Eine rechnerische Bestimmung der zugehörigen Belastungsgrößen für das Deckwerk kann nur näherungsweise erfolgen, z. B. durch folgende Grenzbetrachtung:

- (1) Beide Fahrzeuge begegnen mit gleicher Schiffsgeschwindigkeit. Jedes Fahrzeug erzeugt im zugehörigen Querschnittsbereich sein eigenes Rückströmungsfeld, das entgegen der Fahrt des anderen Schiffes gerichtet ist. In erster Näherung kann dieser Grenzfall so behandelt werden, als ob beide Schiffe in gleicher Richtung fahren und sich die eingetauchten Schiffsquerschnittsflächen addieren. Bezugsquerschnitt ist der Gesamt-Kanalquerschnitt.

Der andere, seltenere Fall im Kanal ist die **Überholung**. Hierbei fährt das eine (meist voll abgeladene) Schiff sehr langsam, das andere (meist leere) sehr schnell, s. Fall (1). Ein Sonderfall tritt auf, wenn beide Schiffe kurzzeitig mit annähernd gleicher Geschwindigkeit nebeneinander herfahren, s. Fall (2). So kann von folgenden zwei Grenzfällen ausgegangen werden:

- (1) Das überholte Schiff steht auf der Stelle und der Überholer fährt i. d. R. mit $0,8 v_{\text{krit}}$ (des Einzelfahrers im Original-Kanalprofil) vorbei. In diesem Fall bewegt sich das erste Schiff in einem um die Schiffsquerschnittsfläche des zweiten Fahrzeugs reduzierten Kanalquerschnitt. Dabei kann der hier empfohlene Bemessungswert der relativen Schiffsgeschwindigkeit des Überholers von $0,8 v_{\text{krit}}$ (bez. Original-Kanalprofil) bei nun kleinerem Kanalquerschnitt sogar größer als $1,0 v_{\text{krit}}$ (bez. reduzierter Kanalquerschnitt) sein. Trifft dies zu, ist von $1,0 v_{\text{krit}}$ (bez. reduzierter Kanalquerschnitt) auszugehen.

- (2) Beide Schiffe fahren mit annähernd der gleichen Schiffsgeschwindigkeit $0,8 v_{\text{krit}}$ (des Einzelfahrers im Original-Kanalprofil). Der maßgebende eingetauchte Schiffsquerschnitt entspricht der Summe aus beiden Einzel-Schiffsquerschnitten. $0,8 v_{\text{krit}}$ des Einzelfahrers kann dabei $1,0 v_{\text{krit}}$ des „Doppelschiffes“ überschreiten. Dann ist $1,0 v_{\text{krit}}$ dieses „Doppelschiffes“ maßgebend.

5.6 Hydraulische Belastungen der Wasserstraße durch Propulsionsströmung (Schraubenstrahl)

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf einen Kanal ohne Grundströmung. Deren Berücksichtigung erfolgt in 6.3.

5.6.1 Induzierte Anfangsgeschwindigkeit des Propellerstrahls im Stand (Schiffsgeschwindigkeit $v_s = 0$)

Die induzierte Anfangsgeschwindigkeit eines Propellers wird für den Fall der Schiffsgeschwindigkeit $v_s = 0$ (Propellerfortschrittsgrad $J = 0$) berechnet. Dies trifft bei Standprobenbedingungen bzw. bei standprobenähnlichen Manövern zu. Es werden die im Folgenden beschriebenen Ansätze zu Grunde gelegt.

- **Propeller ohne Düse** (s. Bild 5.23)

Maximalwert der induzierten Anfangsgeschwindigkeit v_0 nach vereinfachter Strahltheorie [m/s]

$$v_0 = 1,60 f_N n_{\text{Nenn}} D \sqrt{K_T} \quad (5-55)$$

mit

D Propellerdurchmesser [m] (aus Tabelle 5.1)

f_N Faktor zur einsetzbaren Propellerdrehzahl [-]

Empfehlung nach /EAU 1996/:

$f_N \approx 0,75$ für Anfahrmäner aus dem Stand

K_T Schubbeiwert des Propellers für $J = 0$ [-]

n_{Nenn} Nenndrehzahl des Propellers [1/s]
 s. Tabelle 5.1
 Beachte: in Tabelle 5.1 in [1/min]

v_0 induzierte Anfangsgeschwindigkeit nach erfolgter Strahlkontraktion [m/s]

Die induzierte Anfangsgeschwindigkeit v_0 erreicht bei Propellern ohne Düse im Abstand $D/2$ hinter der Propellerebene am Ort der maximalen Strahlkontraktion ihren Maximalwert. Der Strahlquerschnitt hat an dieser Stelle den Durchmesser

$$d_0 \geq \frac{D}{\sqrt{2}} \quad (5-56)$$

mit

d_0 Strahldurchmesser am Ort der maximalen Kontraktion [m]

D Propellerdurchmesser [m] aus Tabelle 5.1

Abschätzung von K_T als obere Grenze (nach /Peters 2002/):

$$K_T = 0,55 \cdot \frac{P}{D} \quad \text{für} \quad \left\{ \begin{array}{l} 0 < \frac{P}{D} < 1,4 \\ J = 0 \end{array} \right. \quad (5-57)$$

mit

P Konstruktionssteigung [m]

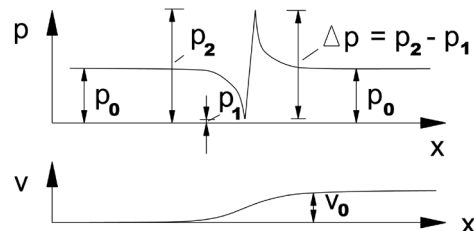
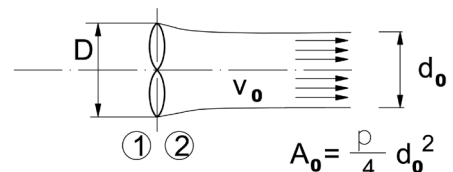
P/D Konstruktionssteigungsverhältnis [-]

$P/D \approx 0,7$ Binnenschiff

$P/D \approx 1,0$ Schubboot

Wenn neben P/D auch das Flächenverhältnis A_A / A_0 (A_A – Anströmfläche vor dem Propeller, A_0 – Querschnittsfläche an der engsten Einschnürung hinter dem Propeller; s. Bild 5.23) und die Flügelzahl z des Propellers bekannt sind, kann zur Berechnung von K_T eine Polynomapproximation aus Versuchen /Oosterveld, Oossannen 1975/ verwendet werden. Bei hinreichender Geometrieinformation können auch Berechnungsprogramme eingesetzt werden (z. B. /PROFIX 2002/).

$$v_S = 0$$



$$v_S \neq 0$$

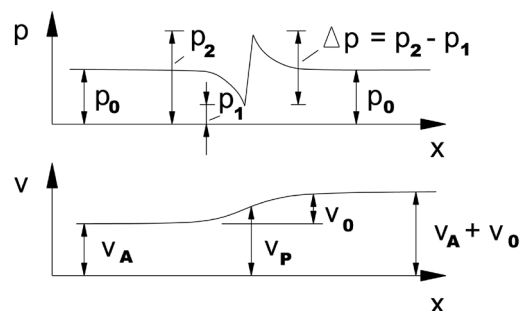
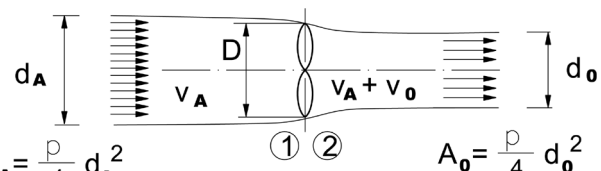


Bild 5.23 Propeller ohne Düse als idealer Druckbeschleuniger (a) $v_S = 0$, (b) $v_S \neq 0$
 oben: Veränderung der Geschwindigkeit beim Durchströmen des Propellers
 Mitte: zugehöriger Druckverlauf
 unten: zugehöriger Geschwindigkeitsverlauf

• **ummantelte Propeller (mit Düse)**

Maximalwert der induzierten Anfangsgeschwindigkeit v_0 durch ummantelte Propeller [m/s]

$$v_0 = 160 \sqrt{0,5} f_N n_{\text{Nenn}} D \sqrt{K_{T,DP}} \quad (5-58)$$

mit

$K_{T,DP}$ Schubbeiwert des Gesamtsystems Düse - Propeller für $J = 0$ [-]

Abschätzung von K_T als obere Grenze (nach /Peters 2002/):

$$K_{T,DP} = 0,67 \cdot \frac{P}{D} \quad \text{für} \quad \left\{ \begin{array}{l} 0 < \frac{P}{D} < 1,8 \\ J = 0 \end{array} \right\} \quad (5-59)$$

Auch hier kann zur Berechnung von K_T eine Polynomapproximation aus Versuchen /Yosifov et al. 1986/ verwendet werden, wenn neben P/D auch das Flächenverhältnis A_E/A_0 (A_E – Eintrittsfläche in die Propellerebene, A_0 – Querschnittsfläche an der engsten Einschnürung hinter dem Propeller) und die Flügelzahl z des Propellers bekannt sind. Bei hinreichender Geometrieinformation steht auch hier ein Berechnungsprogramm zur Verfügung /DVPFIX 2002/.

• **Näherungsrechnung** ausgehend von der **installierten Maschinenleistung**

Maximalwert der induzierten Anfangsgeschwindigkeit v_0 infolge der installierten Maschinenleistung [m/s]

$$v_0 = C \left(\frac{f_p P_{d,Nenn}}{\rho_w D^2} \right)^{1/3} \quad (5-60)$$

mit

C Beiwert [-]

$C \approx 1,2-1,4$ für Propeller mit Düse
 $C \approx 1,5$ für nicht ummantelte Propeller

f_p Faktor zur einsetzbaren Maschinenleistung [-]

Empfehlung nach /EAU 1996/:
 $f_p \approx 0,42$ für Anfahrmanöver aus dem Stand
 (Zusammenhang $f_p = f_N^3$)

$P_{d,Nenn}$ Nennleistung pro Propeller [W]
 s. Tabelle 5.1
 Beachte: in Tabelle 5.1 in [kW]

v_0 induzierte Anfangsgeschwindigkeit [m/s] (bei Propellern ohne Düse nach erfolgter Strahlkontraktion)

ρ_w Dichte des Wasser [kg/m³]

5.6.2 Geschwindigkeit des Propellerstrahls bei Schiffsgeschwindigkeit $v_s \neq 0$

Mit Zunahme der Fahrt des Schiffes steigt die Propellerzustromgeschwindigkeit (Propellerfortschrittsgrad $J \neq 0$). Dabei erfolgt auch eine Veränderung der Geschwindigkeit des Propellerstrahls auf v_{0J} . Bei Propellern ohne Düse sinkt v_{0J} im Bereich kleiner Fort-

schrittsgrade zunächst geringfügig gegenüber v_0 (relativ zum Schiff) ab mit nachfolgendem Anstieg. Der Anstieg hängt wesentlich vom Konstruktionssteigungsverhältnis des Propellers P/D ab und führt im praxisrelevanten Bereich von P/D mit wachsendem Fortschrittsgrad wieder auf die Werte $v_{0J} \approx v_0$. Bei Düsenpropellern tritt die Absenkung bei kleinen Fortschrittsgraden nicht auf. Es kann für Propeller und Düsenpropeller gesetzt werden

$$v_{0J} = v_0.$$

Genauere Abschätzungen der Schubbeiwerte K_{TJ} und $K_{T,DPJ}$ sowie damit der Strahlgeschwindigkeit v_{0J} als obere Grenze sind möglich, wenn für den Propeller D , n und P/D bekannt sind:

• **Propeller ohne Düse**

$$K_{TJ} = 0,55 \frac{P}{D} - 0,46 J \quad (5-61)$$

induzierte Anfangsstrahlgeschwindigkeit v_{0J} [m/s] eines Propellers ohne Düse bei beliebiger Schiffsgeschwindigkeit

$$v_{0J} = \frac{\sqrt{J^2 + 2,55 K_{TJ}}}{\sqrt{1,40 \frac{P}{D}}} v_0 \quad (5-62)$$

• **Propeller mit Düse**

$$K_{T,DPJ} = 0,67 \frac{P}{D} - 0,77 J \quad (5-63)$$

induzierte Anfangsstrahlgeschwindigkeit v_{0J} [m/s] eines Propellers mit Düse bei beliebiger Schiffsgeschwindigkeit

$$v_{0J} = \frac{J + \sqrt{J^2 + 5,10 K_{T,DPJ}}}{\sqrt{3,41 \frac{P}{D}}} v_0 \quad (5-64)$$

$$J = \frac{v_A}{n D} = \frac{v_s(1-w)}{n D} \quad (5-65)$$

mit

D Propellerdurchmesser [m]

J Propellerfortschrittsgrad [-]

$K_{T,DPJ}$ Schubbeiwert eines Propellers mit Düse für $J \neq 0$ [-]

- K_{TJ} Schubbeiwert eines Propellers ohne Düse für $J \neq 0$ [-]
- n Propellerdrehzahl [1/s]
- P Konstruktionssteigung [m]
- P/D Konstruktionssteigungsverhältnis [-]
- v_S Schiffsgeschwindigkeit [m/s]
- v_A Anströmungsgeschwindigkeit des Propellers [m/s]
- v_0 induzierte Anfangsgeschwindigkeit bei $J = 0$ [m/s]
- v_{0J} induzierte Anfangsgeschwindigkeit des Propellerstrahls bei $J \neq 0$ [m/s] (relativ zum Schiff)
- w Nachstromziffer [-]
 $w \approx 0,3$

Bei hinreichender Geometrieinformation können für Propeller mit und ohne Düse auch Berechnungsprogramme eingesetzt werden (z. B. *IDVFIX 2002*; *PROFIX 2002*).

5.6.3 Strahlausbreitungscharakteristik
5.6.3.1 Standardsituationen zur Strahlausbreitung

Die Strahlgeometrie ist wesentlich von folgenden Randbedingungen abhängig:

- Ruderanordnung am Schiff
- Beschränkung des Ausbreitungsraums durch Kaiwände seitlich des Schiffes und in Fortschrittsrichtung der Strahlausbreitung

Diese Randbedingungen werden mit den im Folgenden beschriebenen Standardsituationen erfasst (s. Bild 5.24).

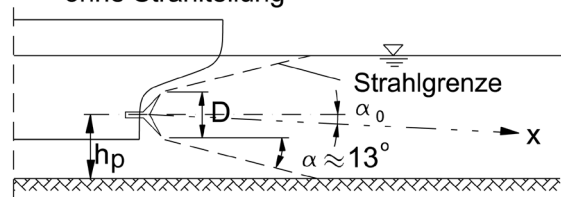
• **Standardsituation 1 (keine Strahlteilung)**

Schraube ohne nachgeordnetes Zentralruder; Begrenzung des Strahls durch die Wassertiefe, aber keine seitliche Begrenzung der Strahlausbreitung

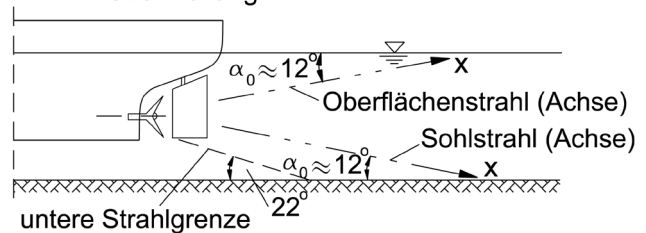
Die Strahlausbreitung erfolgt

- für Propeller ohne Düse mit der Ablenkung der Strahlachse zur Sohle von ca. $\alpha_0 = 2,5^\circ$
- für Propeller mit Düse und bei Schiffen mit Tunnelheck mit der Ablenkung der Strahlachse zur Sohle von ca. $\alpha_0 = 0^\circ$
- in allen Fällen mit dem äußeren Strahlbegrenzungswinkel von ca. $\alpha = 13^\circ$ (definiert an der Stelle $v_{xI} / v_{xmax} = 0,1$ nach Gl. (5-74))

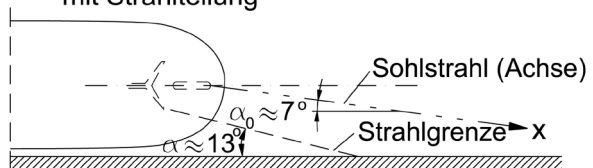
① Antrieb ohne seitliche Begrenzung ohne Strahlteilung



② Antrieb ohne seitliche Begrenzung mit Strahlteilung



③ Antrieb mit seitliche Begrenzung mit Strahlteilung



④ Antrieb mit Begrenzung durch Prallwand ohne Strahlteilung

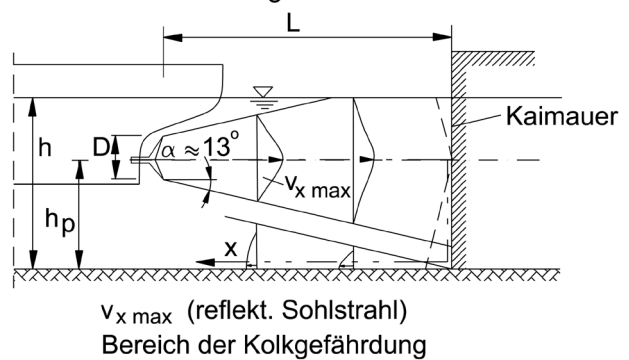


Bild 5.24 "Standardsituationen" der Strahlausbreitung

Für die Zunahme des Strahlkegeldurchmessers gilt:

Zunahme des Strahlkegeldurchmessers d_x [m]

$$d_x = D + 2x \tan \alpha \quad (5-66)$$

mit

x Entfernung von der Propellerebene [m]

α äußerer Strahlbegrenzungswinkel [°]

Bei Schrauben mit Düse und nachgeordnetem Zentralruder findet keine Strahlteilung statt. Es gilt Standardsituation 1.

• **Standardsituation 2 (Strahlteilung)**

Schraube ohne Düse mit nachgeordnetem Zentralruder; Beschränkung der Strahlausbreitung durch die Wassertiefe, aber keine seitliche Begrenzung der Strahlausbreitung

Es tritt eine drallbedingte Strahlaufteilung am Ruder in einen Sohl- und einen Oberflächenstrahl auf, wobei der Sohlstrahl die maßgebenden hydromechanischen Belastungen bewirkt. Die Strahlausbreitung erfolgt mit

- einer Ablenkung der Strahlachsen der beiden Teilstrahlen zur Sohle bzw. zur Wasseroberfläche von jeweils ca. $\alpha_0 = 12^\circ$
- dem äußeren Strahlbegrenzungswinkel von ca. $\alpha = 10^\circ$ gegen die beiden Strahlachsen zur Sohle und zur Gewässeroberfläche

• **Standardsituation 3 (Strahlteilung)**

Schraube ohne Düse mit nachgeordnetem Zentralruder; zusätzliche seitliche Begrenzung der Strahlausbreitung (durch Kaiwand)

Beim Ablegen von senkrechten Wänden findet eine Strahlteilung bei gleichzeitiger Strahlablenkung zur seitlichen Begrenzung hin statt. Die Sohlstrahlausbreitung erfolgt mit

- der seitlichen Ablenkung der Strahlachse in Richtung Kaiwand von ca. $\alpha_0 = 7^\circ$ (horizontal)
- den äußeren Strahlbegrenzungswinkeln von ca. $\alpha = 13^\circ$ horizontal, ca. $\alpha = 12^\circ$ vertikal

• **Standardsituation 4 (keine Strahlteilung)**

Schraube mit Düse (auch mit Zentralruder) oder Schraube ohne Düse ohne nachgeordnetes Zentralruder; vertikale Begrenzung der Strahlausbreitung in Strahlfortschrittsrichtung (z. B. durch eine Kaimauer)

An der Prallwand findet eine Umlenkung zu den Seiten und zur Sohle sowie eine weitere Umlenkung als reflektierter Sohlstrahl statt. Die Strahlausbreitung erfolgt

- ohne Ablenkung der Strahlachse zur Sohle (ca. $\alpha_0 = 0$)
- mit dem äußeren Strahlbegrenzungswinkel von ca. $\alpha = 13^\circ$
- mit äußeren Strahlbegrenzungswinkeln der umgelenkten Strahlen und des reflektierten Sohlstrahls von ca. $\alpha = 13^\circ$

• **Sonstige Situationen**

Nicht alle Belastungssituationen können den vorgenannten Standardsituationen zugeordnet werden. Zwischensituationen können durch geeignete Parameterwahl erfasst werden.

5.6.3.2 Abnahmecharakteristik der Zentralgeschwindigkeit

Charakteristische Größe für den Propellerstrahl ist die Zentralgeschwindigkeit $v_{x,max}$, die sich entlang der Strahlachse in der Entfernung x von der Propellerebene einstellt. Sie wird benötigt, um das die Fahrwasserberandungen belastende vollständige dreidimensionale Geschwindigkeitsfeld zu errechnen

- unter Bezug auf die induzierte Anfangsgeschwindigkeit v_0 (s. 5.6.1) oder v_{0j} (s. 5.6.2),
- aus der relativen Abnahme der Zentralgeschwindigkeit $v_{x,max}/v_0 = Fkt.(x/D)$ und
- in Verbindung mit der nach dem Normalverteilungsgesetz anzusetzenden radialen Geschwindigkeitsverteilung und der jeweiligen "Standardsituation" der Strahlausbreitung (s. 5.6.3.3).

Im Falle einer Schiffsgeschwindigkeit $v_s > 0$ ist in den folgenden Gleichungen (5-67), (5-68), (5-70) und (5-73) die Bezugsgeschwindigkeit v_0 durch v_{0j} (vgl. 5.6.2) zu ersetzen.

Die Abnahme der Zentralgeschwindigkeit lässt sich in drei Bereiche gliedern:

- (1) Zentralgeschwindigkeit im Anlaufbereich (Ausdehnung $x/D \leq 2,6$ ab Propellerebene) für alle Standardsituationen

Zentralgeschwindigkeit v_{xmax} im Anlaufbereich [m/s]

$$\frac{v_{xmax}}{v_0} = 1 \quad (5-67)$$

- (2) Bereich der von Wasserspiegel, Sohle und seitlichen Begrenzungen nicht behinderten Strahlausbreitung ($2,6 < x/D \leq x_{gr}/D$) für alle Standardsituationen

Zentralgeschwindigkeit v_{xmax} bei nicht behinderter Strahlausbreitung [m/s]

$$\frac{v_{xmax}}{v_0} = 2,6 \left(\frac{x}{D} \right)^{-1} \quad (5-68)$$

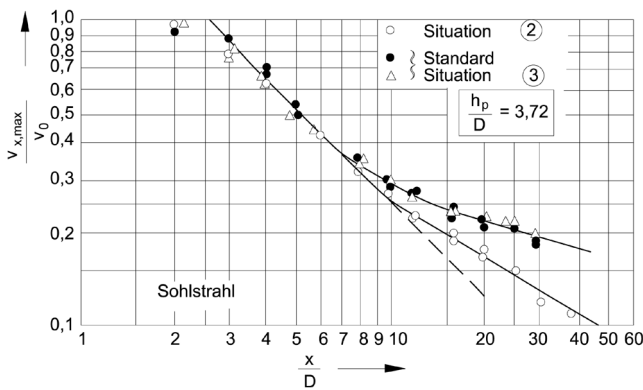


Bild 5.25 Abnahmecharakteristik der Zentralgeschwindigkeit für $h_p/D = 3,72$

In der Entfernung x_{gr} hinter der Propellerebene liegt die Stelle, ab der die Strahlausbreitung durch die Sohle behindert ist. Es gilt

$$\frac{x_{gr}}{D} = \left(\frac{A}{2,6} \right)^{1/(a-1)} \quad (5-69)$$

mit

a, A von der "Standardsituation" des Strahlausbreitungsraums, der Hinterschiffsausbildung sowie der Propeller- und Ruderanordnung abhängige Größen [-], s. u. (3)

D Propellerdurchmesser [m]

x_{gr} Entfernung, ab der die Strahlausbreitung behindert wird [m]

- (3) Bereich der durch Wasserspiegel, Sohle und seitliche Begrenzungen beeinflussten Strahlausbreitung ($x/D > x_{gr}/D$)

Zentralgeschwindigkeit v_{xmax} bei behinderter Strahlausbreitung [m/s]

$$\frac{v_{xmax}}{v_0} = A \left(\frac{x}{D} \right)^{-a} \quad (5-70)$$

mit

a, A von der "Standardsituation" des Strahlausbreitungsraums, der Hinterschiffsausbildung sowie der Propeller- und Ruderanordnung abhängige Größen [-]

Für den Exponenten a gilt je nach Standardsituation:

$a = 0,6$ bei Begrenzung durch Sohle und Wasserspiegel (Standardsituation 1, Standardsituation 2 (Sohlstrahl) und Standardsituation 4 für $x \leq L$ (Anströmbereich bis zur Kaiwand))

$a = 0,3$ bei Begrenzung durch zusätzliche seitliche Wand (Standardsituationen 3 und 4)

$a = 0,25$ für die Strahlausbreitung hinter einem Zweischraubenantrieb

$a = 1,62$ für die Strahlausbreitung des reflektierten Sohlstrahls vor einer Kaiwand (Standardsituation 4, für $x > L+h_p$ (Umlenkbereich ab Kaiwand))

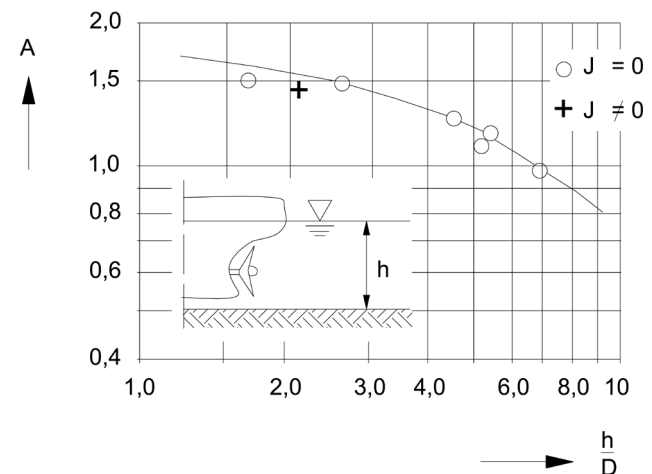


Bild 5.26 Beiwert $A = Fkt.(h/D)$ (Standardsituation 1)

Für den Beiwert A gilt:

- (1) Bei nur durch Sohle und Wasserspiegel begrenzter Strahlausbreitung hinter einem Propeller ohne Strahlteilung, d. h. für Propeller ohne nachgeordnetes Zentralruder bzw. für Propeller mit Düse (in diesem Fall auch mit nach-

geordnetem Zentralruder) für $1,0 \leq h/D \leq 9$ (Standardsituation 1, s. Bild 5.26):

$$A = 1,88 e^{-0,092 (h/D)} \quad (5-71)$$

mit

h Wassertiefe [m]

- (2) Bei Strahlteilung durch ein dem Propeller nachgeordnetes Zentralruder ($0,7 \leq h_p/D \leq 5$) (Standardsituationen 2 und 3, s. Bild 5.27):

$$A = 1,88 e^{-0,061 (h_p/D)} \quad (5-72)$$

mit

h_p Höhenlage der Propellerachse über der Sohle [m]

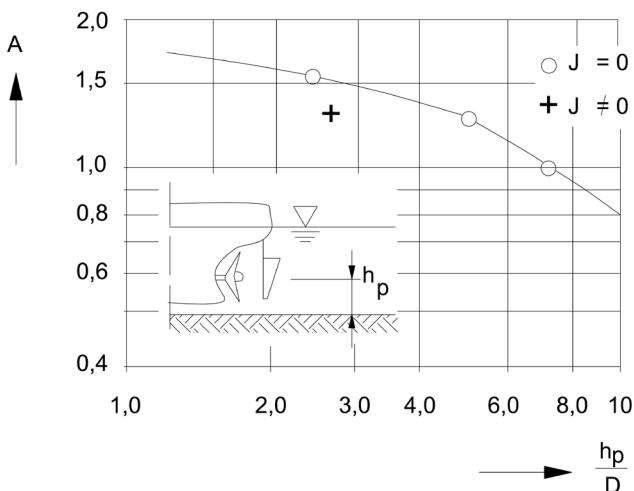


Bild 5.27 Beiwert $A = \text{Fkt.}(h_p/D)$ (Standardsituation 2)

- (3) Bei Zweischaubenantrieb näherungsweise $A = 0,9 = \text{konst}$ (gegenseitige Strahlbeeinflussung überwiegt gegenüber dem Wassertiefeneinfluss).

- (4) Bei Begrenzung des Ausbreitungsraums durch eine in Strahlfortschrittsrichtung liegende Prallwand (für den reflektierten Sohl- und Wandstrahl, $x \geq L+h_p$), (Standardsituation 4, s. Bild 5.28):

$$A = \left(\frac{v_{x \max}(L)}{v_0} \right) \left(\frac{L+h_p}{D} \right)^{1,62} \quad (5-73)$$

mit

h_p Höhenlage der Propellerachse über der Sohle (Lauflänge des an der Wand nach unten umgelenkten Strahls bis zur Sohle) [m]

L Abstand Prallwand - Propellerebene [m]

D Propellerdurchmesser [m]

$v_{x \max}(L)$ Zentralgeschwindigkeit im Abstand L hinter der Propellerebene [m/s]

Als für die Kolkbildung am Fuß der Kaiwand maßgebende Strahlgeschwindigkeit wird dabei die an der Stelle $x = L$ auftretende Geschwindigkeit angesetzt (s. Bild 5.28).

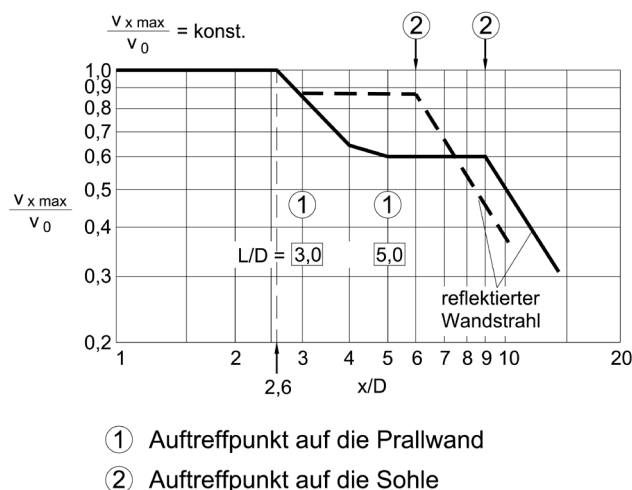


Bild 5.28 Strahlausbreitungscharakteristik des Zweischaubenantriebs eines Seeschiffs bei Reflexion an einer Prallwand bei Prallabständen $L/D = 3,0$ und $5,0$ (Standardsituation 4) [Römisch 1975]

5.6.3.3 Berechnung der Strahlgeschwindigkeitsverteilung quer zur Strahlachse

Die Strahlgeschwindigkeitsverteilung v_{xr} quer zur Strahlachse im Strahlauftreffbereich folgt, ausgehend von

- der Strahlachsenlage über bzw. an der Sohle in der Entfernung x von der Propellerebene (s. 5.6.3.1) und
- der Zentralgeschwindigkeit $v_{x \max}$

Beachte: Berechnung von $v_{x \max}$ in den Gln. (5-67), (5-68), (5-70) mit

$$\rightarrow v_0 \text{ bei } v_s = 0 \text{ bzw. } J = 0$$

$$\rightarrow v_{0J} \text{ bei } v_s \neq 0 \text{ bzw. } J \neq 0$$

über die radiale Geschwindigkeitsverteilung:

$$\frac{v_{xr}}{v_{x \max}} = e^{-22,2 (r_x/x)^2} \quad (5-74)$$

mit

r_x radialer Abstand des betrachteten Punktes, z. B. der Sohle, von der Strahlachse in der Entfernung x von der Propellerebene [m]

v_{xr} Strahlgeschwindigkeit relativ zum Schiff im Radius r_x [m/s]

Die Strahlgeschwindigkeit v_{xr1} an der und relativ zur Sohle unter Berücksichtigung der Schiffsgeschwindigkeit ergibt sich wie folgt:

$$v_{xr1} = v_{xr} \left(1 - \frac{v_s}{n D} \right) \tag{5-75}$$

mit

D Propellerdurchmesser [m]

n Propellerdrehzahl [1/s]

v_{xr} Strahlgeschwindigkeit relativ zum Schiff im Radius r_x [m/s]

v_s Schiffsgeschwindigkeit [m/s]
ggf. vorzeichenbehaftet einsetzen: v_s ist negativ, wenn Schiffsbewegung und Propellerstrahl in die gleiche Richtung zeigen, z. B. bei einem Stoppvorgang

Für die Belastung einer ebenen Gewässersohle ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen r_x , x und h_p (vgl. Bild 5.29):

$$r_x = (h_p - x \sin \alpha_0) / \cos \alpha_0 \tag{5-76}$$

$$x_s = x \cos \alpha_0 - r_x \sin \alpha_0 \tag{5-77}$$

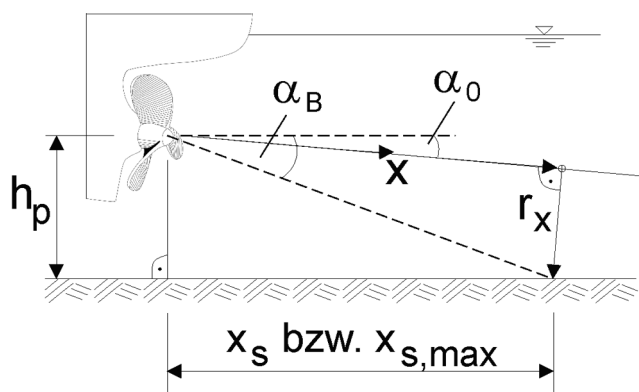


Bild 5.29 Geometrische Definitionen zur Berechnung der Sohlgeschwindigkeitsverteilungen quer zur Strahlachse

Die mit den Gln. (5-74) - (5-77) berechnete Sohlgeschwindigkeit steigt zunächst in x -Richtung an und fällt dann wieder ab. Das Maximum der Sohlge-

windigkeit v_{xr} wird für die Steinbemessung als v_{Bmax} bezeichnet. Für Überschlagsrechnungen ergibt sich die Lage dieses Maximums aus folgender Gleichung:

$$x_{S,max} = \frac{h_p}{\tan \alpha_B} \tag{5-78}$$

mit

h_p Höhe Propellerachse über Sohle [m]

$x_{S,max}$ Lage der maximalen Sohlgeschwindigkeit hinter dem Drehpunkt der Propellerebene [m]

α_B durchschnittlicher Ablenkungswinkel
 $\alpha_B = 8,5^\circ$ für die Standardsituationen 1 bzw. 4 bei $x_{S,max} < L$
 $\alpha_B = 13^\circ$ für die Standardsituationen 2 bzw. 3 (s. 5.6.3.1)

Der Einfluss des Propellerfortschrittsgrades auf v_0 und damit auf v_{xmax} und v_{Bmax} wurde mit den Gln. (5-61) bis (5-65) bereits berücksichtigt. Der Propellerfortschrittsgrad beeinflusst aber auch die Auftreffgeschwindigkeit auf die Sohle, die mit Gl. (5-80) näherungsweise erfasst wird.

Für die Belastung einer in Strahlrichtung ansteigenden Uferböschung können die in 5.6.3.1 genannten Standardsituationen hinsichtlich der Strahlausbreitungsscharakteristik sinngemäß angewendet werden. Das Maximum der Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle bzw. der Uferböschung muss durch Anwendung der Gl. (5-74) unter Beachtung der geometrischen Randbedingungen nach Bild 5.30, Bild 6.4 und Gl. (6-8) gefunden werden. Hierbei ist eine sinnvolle Annahme des größten Winkels zwischen Schiffsachse und Uferlinie zu treffen. Große Winkel treten z. B. bei Kurvenfahrt auf.

Bei einem Ablegemanöver entsteht der Strahlgriff auf die Uferböschung durch Umlenkung des Strahls an den Rudern. Der für die Bemessung relevante kleinste Wert des Winkels β_{St} zwischen Böschungsnormaler und umgelenkter Strahlachse (s. Bild 6.4) kann dabei 15° betragen. Durch die Umlenkung wird die Strahlgeschwindigkeit auf ca. 85 % des Ausgangswertes am Propeller reduziert.

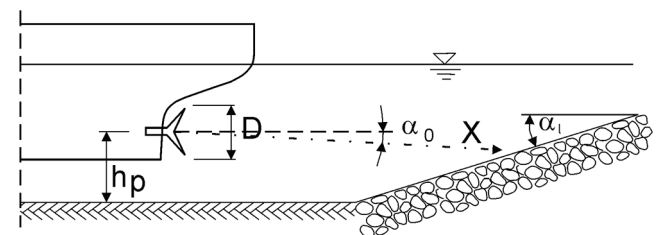


Bild 5.30 Prinzipische Skizze zum Strahlgriff auf geböschtes Ufer (Längsneigungswinkel α_1 s. auch 6.3.1)

5.6.3.4 Mehrschraubenantriebe

Bei Mehrschraubenantrieben ist nach /Römisch 1994/ zunächst die Strahlausbreitung der einzelnen Schiffschrauben mit den in 5.6.1 - 5.6.3.3 genannten Algorithmen separat zu untersuchen. Um das Zusammenwirken der Teilantriebe zu erfassen, können die v_{xr} -Werte näherungsweise addiert werden. Für $\alpha_0 = 0^\circ$ in der Standardsituation 1 ergeben sich dabei die in Bild 5.31 dargestellten geometrischen Randbedingungen.

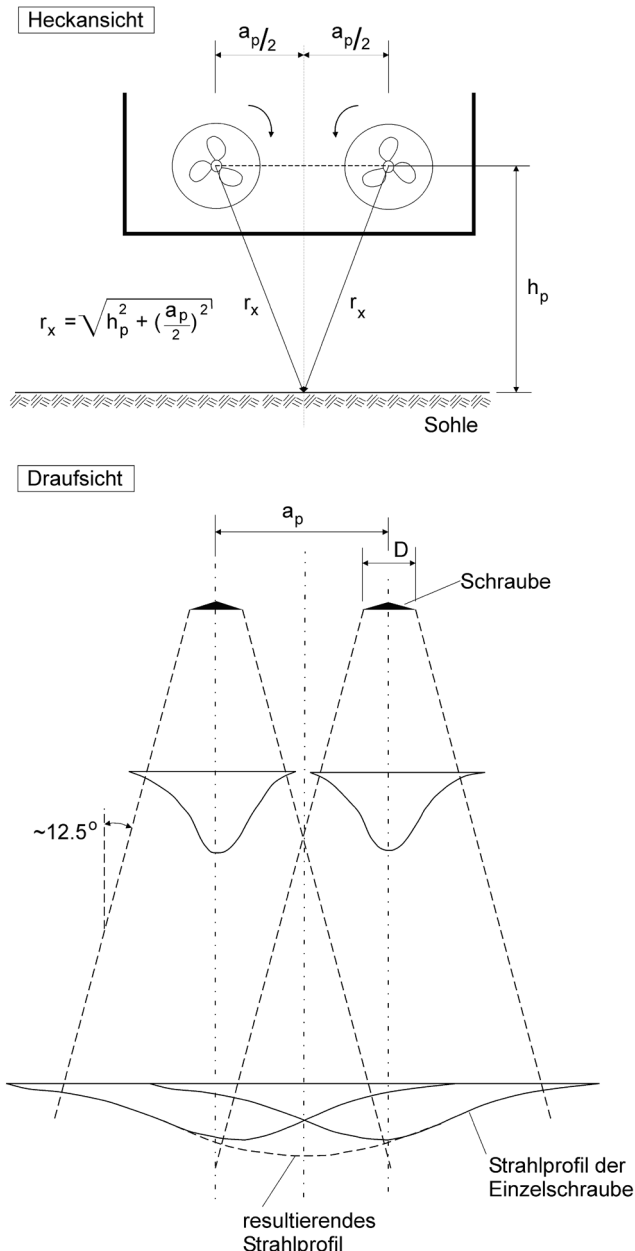


Bild 5.31 Heckansicht eines Zweischaubers mit Überlagerungsbereich der beiden Teilstrahlen für Standardsituation 1, $\alpha_0 = 0^\circ$

Für $\alpha_0 \neq 0^\circ$, bei einer seitlichen Strahlausbreitung oder für einen schrägen Strahlgriff auf das Ufer empfiehlt sich für eine sinnvolle Überlagerung der Teilstrahlen eine Skizze mit allen relevanten geometrischen Abmessungen.

Größere Werte der Strahlgeschwindigkeit an der Sohle als nach der Addition können sich ergeben, wenn die Propeller eines Zweischaubers gegeneinander zur Mitte hin schlagen, so wie in Bild 5.31 angedeutet.

5.6.4 Vereinfachte Berechnung der maximalen Sohlgeschwindigkeit

Für Ein- und Mehrschrauber in einigen unten genannten Fällen wird im Folgenden eine vereinfachte Berechnung der maximalen Sohlgeschwindigkeit für Propellerfortschrittsgrade $J = 0$ und $J \neq 0$ angegeben. Sie kann nur für Fälle ohne Strahlüberlagerung angewendet werden.

• **Schiffsgeschwindigkeit $v_s = 0$**

Die maximale Sohlgeschwindigkeit im Auftreffpunkt des Propellerstrahls v_{Bmax} kann für die Standardsituationen 1, 2 und 3 der Strahlausbreitung (s. 5.6.3.1) näherungsweise für $J = 0$ wie folgt abgeschätzt werden:

maximale Sohlgeschwindigkeit im Auftreffpunkt v_{Bmax} für $J = 0$ (vereinfachte Berechnung) [m/s]

$$v_{Bmax} = E \left(\frac{D}{h_p} \right) v_0 \tag{5-79}$$

mit

- D Propellerdurchmesser [m]
- h_p Höhenlage der Propellerachse über der Sohle [m]
- E Beiwert zur Charakterisierung von Heckform und Ruderanordnung [-] (s. Bild 5.32)
 - $E = 0,71$ für schlanke Heckformen mit Zentralruder
 - $E = 0,42$ für schlanke Heckformen ohne Zentralruder
 - $E = 0,25$ für moderne Binnenschiffe mit Tunnelheck und Zwillingruder
- v_0 induzierte Anfangsgeschwindigkeit bei $J = 0$ [m/s] s. 5.6.1

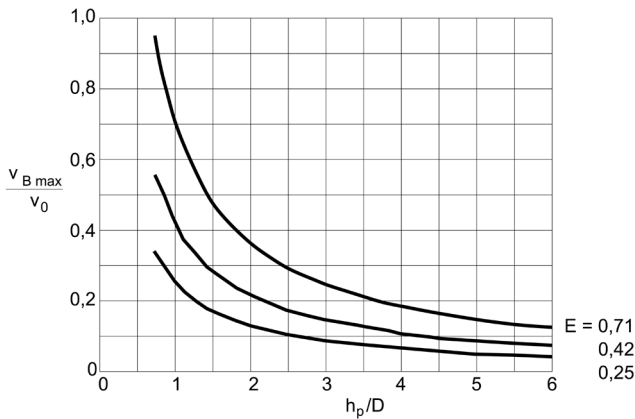


Bild 5.32 Veränderung der relativen maximalen Sohlgeschwindigkeit des Propellerstrahls $v_{Bmax} / v_0 = Fkt.(h_p/D, E)$

Schiffsgeschwindigkeiten vernachlässigbar und die Belastungsverhältnisse wie bei $J = 0$ anzusetzen.

5.6.5 Belastung durch Bugstrahlruder

Nach /Schokking 2002/ treten bemessungsrelevante Deckwerksschäden durch Bugstrahlrudereinsatz im Bereich von Anlegestellen auf. Die Schiffsgeschwindigkeit über Grund ist hier vernachlässigbar klein; nachfolgend wird deshalb von $v_s = 0$ ausgegangen. Es wird unterschieden zwischen kurzzeitiger Belastung durch ein Anlegemanöver und Dauerbeanspruchung sowie der Belastung eines geböschten Ufers (Böschungswinkel $< 45^\circ$) und der Sohle vor einem senkrechten Ufer (Kaimauer), siehe Bild 5.33. Diese Belastung ist während der Fahrt ($v_s \neq 0$) i. d. R. nicht bemessungsrelevant, da der Strahl dann umgelenkt wird.

• Schiffsgeschwindigkeit $v_s \neq 0$

Mit Fahraufnahme des Schiffes, d. h. wachsendem Propellerfortschrittsgrad, verringern sich die induzierte Anfangsgeschwindigkeit und die entsprechende Auftreffgeschwindigkeit des Propellerstrahls auf die Fahrwasserberandungen.

Die maximale Sohlgeschwindigkeit v_{Bmax1} bei dem Propellerfortschrittsgrad $J \neq 0$ errechnet sich in diesem Fall näherungsweise nach

maximale Sohlgeschwindigkeit im Auftreffpunkt v_{Bmax1} für $J \neq 0$ (vereinfachte Berechnung) [m/s]

$$v_{Bmax1} = v_{Bmax} \left(1 - \frac{v_s}{n D} \right) \quad (5-80)$$

mit

D Propellerdurchmesser [m]

n Propellerdrehzahl [1/s]

v_{Bmax} maximale Sohlgeschwindigkeit im Auftreffpunkt bei $J = 0$ [m/s]

v_s Schiffsgeschwindigkeit [m/s]
ggf. vorzeichenbehaftet einsetzen: v_s ist negativ, wenn Schiffsbewegung und Propellerstrahl in die gleiche Richtung zeigen, z. B. bei einem Stoppvorgang

Dieser Ansatz gilt auch zur Ermittlung der Reduktion der Sohlgeschwindigkeiten bei der Berechnung des vollständigen Auftreffgeschwindigkeitsfeldes gemäß 5.6.3.3.

Bei beengten Fahrwasserhältnissen (z. B. bei Schleusenausfahrten) sind die o. g. Sohlgeschwindigkeitsreduktionen wegen der infolge der starken Fahrwasserbegrenzung erreichbaren, nur sehr geringen

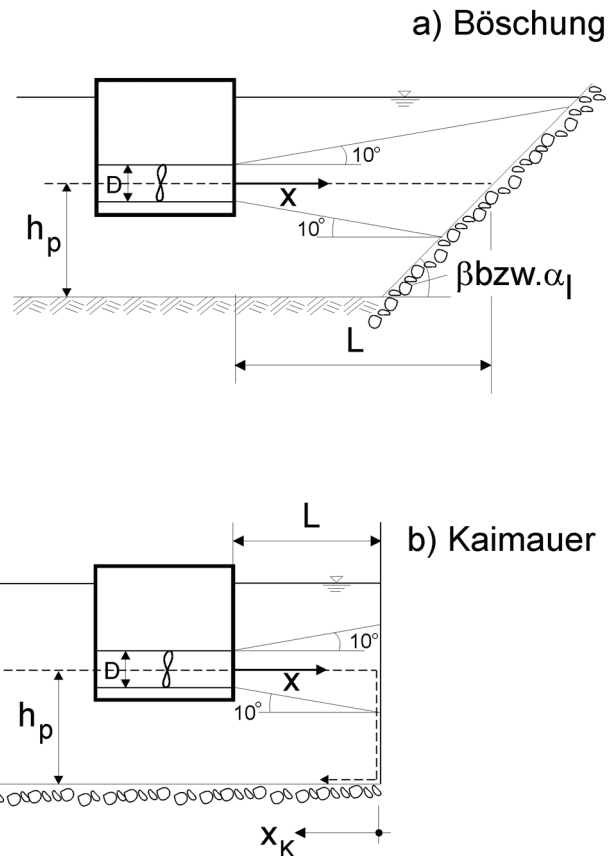


Bild 5.33 Strahlausbreitung bei Belastung durch Bugstrahlruder; (a): geböschtes Ufer, (b): Kaimauer mit Strahlumlenkung zur Sohle $\beta =$ Böschungswinkel $\alpha_1 =$ Längsneigungswinkel s. Bild 6.4 und Gl. (6-8)

Die induzierte Anfangsgeschwindigkeit v_0 entspricht in etwa der eines Düsenpropellers mit dem Propellerfortschrittsgrad $J = 0$. Es gilt nach /EAU 1996; Blaauw, Kaa 1978/ abhängig von der Leistung

$$v_0 \approx 1,1 \left(\frac{P_{\text{Bug}}}{\rho_W D^2} \right)^{1/3} \quad (5-81)$$

mit

P_{Bug} installierte Maschinenleistung des Bugstrahlruders [W] s. Tabelle 5.1

Beachte: in Tabelle 5.1 in [kW]

D Rohrdurchmesser \approx Propellerdurchmesser des Bugstrahlruders [m]

ρ_W Dichte des Wassers [kg/m^3]

bzw. mit Gl. (5-58), abhängig vom Schubbeiwert

$$v_0 = 1,13 n D \sqrt{K_{T,DP}}$$

mit

$K_{T,DP}$ Schubbeiwert eines ummantelten Propellers [-] für $J = 0$ wie bei Gl. (5-58)

n Schraubendrehzahl des Bugstrahlruders [1/min]

Die Abnahme der induzierten Anfangsgeschwindigkeit ist beim Bugstrahlruder geringer als bei freien Propellern. Aus Messwerten von /Schokking 2002/ gilt für die maximale axiale Strömungsgeschwindigkeit (Zentralgeschwindigkeit) $v_{x\text{max}}$ an einem geböschten Ufer:

maximale axiale Strömungsgeschwindigkeit eines Bugstrahlruders an einem geböschten Ufer $v_{x\text{max}}$ [m/s]

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{x\text{max}} = v_0 \quad \text{für } \frac{x}{D} \leq 1,0 \\ v_{x\text{max}} = v_0 \left(\frac{x}{D} \right)^{-1/3} \quad \text{für } \frac{x}{D} > 1,0 \end{array} \right\} \quad (5-82)$$

mit

D Rohrdurchmesser \approx Propellerdurchmesser [m]

$v_{x\text{max}}$ maximale axiale Strömungsgeschwindigkeit, Zentralgeschwindigkeit [m/s]

v_0 induzierte Anfangsgeschwindigkeit [m/s]

x Entfernung von der Austrittsseite des Bugstrahlruders [m]

Der Bemessungswert tritt für $x = L$ an der Böschung auf.

Am Fuß einer Kaimauer beträgt der Größtwert der Strahlgeschwindigkeit an der Sohle $v_{\text{max,S,K}}$ /Blokland 1994/ :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{\text{max,S,K}} = 1,0 \frac{v_0 D}{h_P} \quad \text{für } \frac{L}{h_P} < 1,8 \\ v_{\text{max,S,K}} = 2,8 \frac{v_0 D}{L + h_P} \quad \text{für } \frac{L}{h_P} \geq 1,8 \end{array} \right\} \quad (5-83)$$

mit

h_P Höhenlage der Achse des Bugstrahlruders über der Sohle [m]

L Abstand Austrittsfläche Bugstrahlruder - Kaimauer [m]

$v_{\text{max,S,K}}$ maximale Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle am Fuß der Kaimauer [m/s]

Die weitere Abnahme des Strahls an der Sohle $v_{\text{max,S,xK}}$ nach Umlenkung kann analog zum Propellerstrahl des Hauptantriebs wie folgt in Abhängigkeit vom Abstand x_K von der Kaimauer errechnet werden:

$$v_{\text{max,S,xK}} = v_{\text{max,S,K}} \left(\frac{L + h_P}{x} \right)^{1,62} \quad (5-84)$$

mit

x Entfernung entlang der Strahlachse ab Düsenaustritt über Kaimauer und Sohle [m]
 $x = L + h_P + x_K$

x_K Abstand des umgelenkten Strahls auf der Sohle ab Kaimauer [m]

$v_{\text{max,S,xK}}$ veränderte maximale Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle nach der Umlenkung im Abstand x_K von der Kaimauer [m/s]

Die Ermittlung der erforderlichen Steingröße eines unverklammerten Deckwerks erfolgt nach 6.3. Die Berücksichtigung eines Teilvergusses wird unter Kap. 8 und 9 angesprochen.

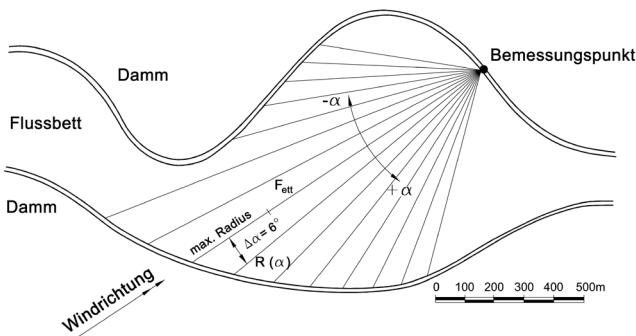
5.7 Windstau und Windwellen

5.7.1 Allgemeines

Abhängig von Windrichtung, -geschwindigkeit und -dauer entstehen Wellen, die in Kombination mit anderen Wellen zu berücksichtigen sind. Dies ist bei Gewässern in großen Flächen (Rheinebene, norddeutsche Tiefebene) und bei langgestreckten, breiten Gewässerabschnitten (Stauhaltungen) wichtig. Bei Kanälen sind Windwellen in der Regel zu vernachlässigen, Windstau kann jedoch vor allem in langen Stauhaltungen von Bedeutung sein.

5.7.2 Winddaten

Angaben über Windrichtungen, -geschwindigkeiten und -dauer sind beim lokalen Wetteramt zu erfragen oder den statistischen Unterlagen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zu entnehmen. Werte für anzusetzende Windgeschwindigkeiten sind auch in gültigen DIN-Normen angegeben. In Einzelfällen kann es ratsam sein, die für die Berechnungen notwendigen Winddaten genauer festzulegen (z. B. bei zweidimensionaler Windverteilung, Extremwertstatistik detailliert nach Richtungen); hierzu sind Experten zu Rate zu ziehen. Modifizierungen des Windfeldes können durch die lokale Topographie entstehen.



α [°]	$\cos \alpha$ [-]	$\cos^2 \alpha$ [-]	$R(\alpha)$ [m]	$R(\alpha) \cos^2 \alpha$ [m]
-42	0,743	0,552	520	287
-36	0,809	0,654	570	373
-30	0,866	0,750	640	480
-24	0,914	0,835	720	601
-18	0,951	0,904	830	750
-12	0,973	0,956	1340	1281
-6	0,995	0,990	1240	1228
0	1,000	1,000	1140	1140
6	0,995	0,990	1050	1040
12	0,973	0,956	980	937
18	0,951	0,904	920	832
24	0,914	0,835	880	735
30	0,866	0,750	830	623
36	0,809	0,654	780	510
42	0,743	0,552	730	403
$\Sigma 13,512$		$\Sigma 11220$		

der effektive Fetch F_{eff} lautet :

$$F_{\text{eff}} = \frac{\sum R(\alpha) \cdot \cos^2 \alpha}{\sum \cos \alpha}$$

$$F_{\text{eff}} = \frac{11220}{13,512}$$

$$F_{\text{eff}} = 830 \text{ m}$$

Bild 5.34 Definitionsskizze und Beispiel zur Berechnung der effektiven Windwirklänge (effektiver Fetch) bei beliebiger Windrichtung, aus ICUR-TAW 1992/

5.7.3 Windwirkgebiet / Mindestwirkdauer

Der herrschende Wind benötigt zur Wellenerzeugung ein Windwirkgebiet eines bestimmten Verhältnisses von Breite/Länge, dessen Länge als **effektiver Fetch** F_{eff} in die Berechnungen eingeht. In ICUR-TAW 1992/ wird zur näherungsweise Ermittlung von F_{eff} ein Berechnungsverfahren nach der Sektorenmethode vorgestellt, das die Umrandung der Wasserfläche in der Umgebung des zu bemessenden Deckwerks berücksichtigt. Folgende Vorgehensweise gilt dabei (s. Bild 5.34):

1. Auf einem Lageplan wird die Hauptwindrichtung bezüglich des Bemessungspunktes eingetragen.
2. In einem Wirkungsfächer von $\pm 45^\circ$ links und rechts der Hauptwindrichtung werden in einer frei wählbaren Schrittweite $\Delta\alpha$ (s. Beispieltabelle Bild 5.34: $\Delta\alpha = 6^\circ$) die tatsächlichen Windwirkstrecken zwischen dem Bemessungspunkt und dem gegenüberliegenden Uferpunkt (evtl. auch Leitwerk, trockenliegendes Vorland o. ä.) ermittelt.
3. Der effektive Fetch bestimmt sich aus diesen Eingangswerten nach folgender Formel:

effektiver Fetch F_{eff} [m]

$$F_{\text{eff}} = \frac{\sum R(\alpha) \cos^2 \alpha}{\sum \cos \alpha} \tag{5-85}$$

mit

F_{eff} effektiver Fetch [m]

$R(\alpha)$ Einflusslänge zum gegenüberliegenden Ufer beim Winkel α [m]

α Winkel der Einflussrichtung [°]

Das beschriebene Verfahren ist anwendbar, wenn der ermittelte Wert des effektiven Fetches ungefähr mit dem 'straight-line fetch' übereinstimmt. Dieser ist die Entfernung zwischen Bemessungspunkt und der Grenze der Wasserfläche in Windrichtung IEAK 2002/. Er ist nur bei regelmäßigen Uferlinien zu verwenden.

Um im vorliegenden Windwirkgebiet die maximal mögliche Wellenhöhe erzeugen zu können, muss die herrschende Windgeschwindigkeit eine Mindestzeit andauern. Ist die tatsächliche Winddauer geringer, so stellt sich nur eine kleinere Wellenhöhe ein.

Für die erforderliche Windwirkdauer gilt (Beachte: nicht dimensionsrein \Rightarrow Verwenden der angegebenen Dimensionen; s. Bild 5.35) /ACER 1992/:

Mindest-Windwirkdauer t_{\min} [h]

$$t_{\min} = \frac{F_{\text{eff}}^{2/3}}{u^{0,41}} \quad (5-86)$$

mit

- F_{eff} effektiver Fetch [km]
- t_{\min} Mindest-Windwirkdauer [h]
- u Windgeschwindigkeit [m/s]
(ggf. repräsentativer Mittelwert)

Bei stark veränderlichen Windgeschwindigkeiten kann ein Durchschnittswert von u durch quadratische Mittelung der Einzelwerte einer repräsentativen u -Ganglinie im Zeitraum t_{\min} erhalten werden. Der betrachtete Zeitraum für die Mittelung ist im Sinne eines Maximums von u zu wählen.

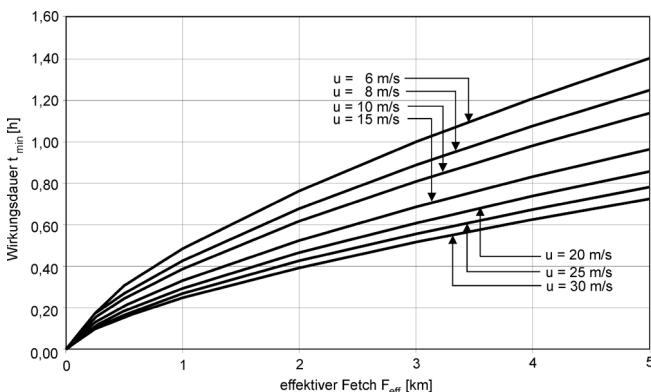


Bild 5.35 Erforderliche Windwirkdauer abhängig von Fetch und Windgeschwindigkeit zur Ausbildung einer Wellenhöhe, nach /ACER 1992/

5.7.4 Windstau

Weht der Wind eine längere Zeitspanne mit annähernd konstanter Geschwindigkeit aus gleichbleibender Richtung, so kommt es durch die Schleppspannung zwischen Luftströmung und Wasseroberfläche zu einer Wasserspiegelanhebung - dem Windstau Δh_w - am windabgewandten Ende des Windwirkgebietes /DVWK 246; Poweleit 1985/. Anhaltswerte ergeben sich aus der sogenannten Zuidersee-Formel (Beachte: nicht dimensionsrein \Rightarrow Verwenden der angegebenen Dimensionen):

Windstauhöhe Δh_w am Ende des Windwirkgebietes [m]

$$\Delta h_w = \frac{u^2 S}{4861 h_m} \cos \alpha \quad (5-87)$$

mit

- h_m mittlere Wassertiefe [m]
- S maximale Streichlänge [km]
(nicht: effektiver Fetch)
- u Windgeschwindigkeit [m/s]
- α Winkel zwischen Hauptwindrichtung und Richtung der Böschungfalllinie [°]
- Δh_w Windstauhöhe am windabgewandten Ende des Windwirkgebietes [m]

Der ungünstigste Wert für Δh_w ergibt sich bei $\cos \alpha = 1$. Einen Eindruck möglicher Werte für den Windstau vermittelt die graphische Auswertung der Formel (s. Bild 5.36).

Für den Windstau kann vereinfacht pauschal ein Wert von $\Delta h_w = 0,05$ m angesetzt werden, wenn die mittlere Streichlänge $S_m < 1500$ m und die mittlere Wassertiefe $h_m > 6$ m ist, vgl. /DVWK 246/.

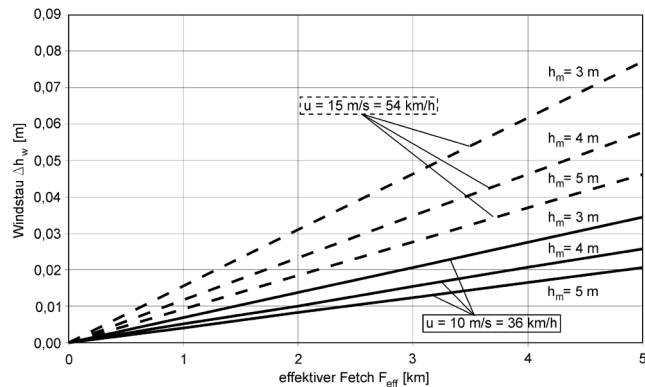


Bild 5.36 Windstauhöhe Δh_w abhängig von maximaler Streichlänge S und mittlerer Wassertiefe h_m für zwei Windgeschwindigkeiten u und $\cos \alpha = 1$

5.7.5 Windwellen

Im Bereich von Binnengewässern und Flussmündungen stehen wenige Aussagen über die mögliche Höhe winderzeugter Wellen zur Verfügung. Die signifikante oder Bemessungswellenhöhe und die zugehörige Wellenperiode hängen direkt von der vorgegebenen Windgeschwindigkeit, der mittleren Wassertiefe und dem effektiven Fetch ab.

Eine Möglichkeit, Wellenhöhe und -periode zu bestimmen, sind z. B. die Formeln für Tiefwasserwellen von Brettschneider, die nach */CUR-TAW 1992/* auf den Binnenwasserbereich wegen der dort auftretenden kleineren Wellen übertragen werden können. Dies ist zulässig bis zu Windgeschwindigkeiten von $u = 12$ m/s (entspricht einer Windstärke von 5 nach Beaufort). Diese Obergrenze ist ausreichend, da Schifffahrt bei Leerfahrt und Containerladungen nur bis max. 8 m/s stattfindet und auch nur für solche Situationen Überlagerungen von schiffs- und winderzeugten Wellen relevant sind. Sollen allein wirkende Wellen bei der Bemessung berücksichtigt werden, so wird auf die Fachliteratur verwiesen, z. B. */CEM 2002; Wagner 1996/*

Die Bestimmungsgleichung für die signifikante Wellenhöhe $H_s = \text{Fkt.}(h_m, u, F_{\text{eff}})$ lautet:

Bestimmungsgleichung der signifikanten Wellenhöhe H_s [m]

$$\frac{g H_s}{u^2} = 0,283 \tanh \left[0,530 \left(\frac{g h_m}{u^2} \right)^{0,750} \right] \cdot \tanh \frac{0,0125 \left(\frac{g F_{\text{eff}}}{u^2} \right)^{0,42}}{\tanh \left[0,530 \left(\frac{g h_m}{u^2} \right)^{0,750} \right]} \quad (5-88)$$

mit

- F_{eff} effektiver Fetch [m]
- g Erdbeschleunigung [m/s²]
- h_m mittlere Wassertiefe [m]
- H_s signifikante Wellenhöhe [m]
- u Windgeschwindigkeit [m/s]

Für die zugehörige charakteristische Wellenperiode $T = \text{Fkt.}(h_m, u, F_{\text{eff}})$ gilt:

Bestimmungsgleichung der zugehörigen charakteristischen Wellenperiode T [s]

$$\frac{g T}{u} = 2\pi \cdot 1,2 \tanh \left[0,833 \left(\frac{g h_m}{u^2} \right)^{0,375} \right] \cdot \tanh \frac{0,077 \left(\frac{g F_{\text{eff}}}{u^2} \right)^{0,25}}{\tanh \left[0,833 \left(\frac{g h_m}{u^2} \right)^{0,375} \right]} \quad (5-89)$$

mit

T Wellenperiode [s]

Umgearbeitet auf kleine effektive Fetchlängen, wie sie auf Binnengewässern vorliegen, bieten diese Formeln die Möglichkeit, Bemessungswellenhöhen ohne großen numerischen Aufwand direkt abzulesen. In Graphiken (s. Bild 5.37) sind Wassertiefen von 1 bis 6 m, Windgeschwindigkeiten zwischen 8 und 14 m/s sowie Fetchlängen bis 5 km eingearbeitet. Für größere Wassertiefen ergeben sich nur unwesentlich größere Wellenhöhen als für $h_m = 6$ m. Für Sonderfragen können Wellenhöhen aus Gl. (5-88) bestimmt werden.

Für die Wassertiefe muss ein mittlerer Wert gesetzt werden. Lokale Untiefen können vernachlässigt werden. Der Nahbereich der Seitendämme muss wegen des Einflusses veränderlicher Wassertiefen auf die Wellenhöhe gesondert betrachtet werden (s. 5.8.2, 5.8.4).

Alternativ zu den rein rechnerisch ermittelten Wellenkennwerten können diese auch aus Messungen mittels statistischer Verfahren ermittelt werden.

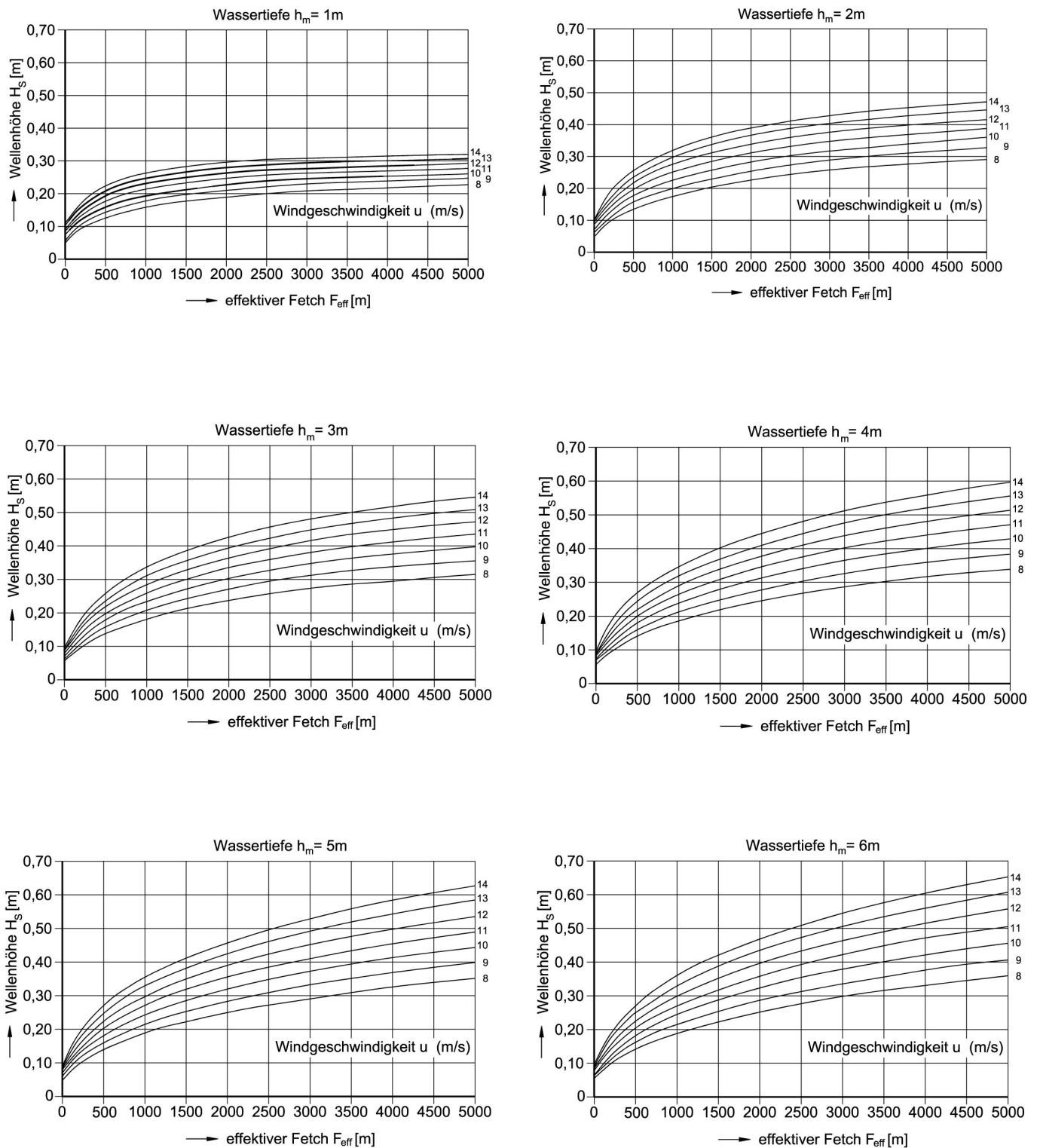


Bild 5.37 Signifikante Wellenhöhe H_s abhängig von Windgeschwindigkeit u und effektivem Fetch F_{eff} für verschiedene Wassertiefen h_m , nach ICUR-TAW 1992/

Die zugehörige Wellenlänge L kann allgemein nach folgender Formel implizit bestimmt werden:

Wellenlänge L allgemein [m]

$$\frac{L}{T} = c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(2\pi \frac{h_m}{L}\right)} \quad (5-90)$$

- mit
- c Wellenfortschrittsgeschwindigkeit [m/s]
 - L Wellenlänge [m]

Für Flachwasserwellen mit $h_m/L \ll 1$ (d. h. $\tanh(2\pi h_m/L) \approx 2\pi h_m/L$) wird daraus:

Wellenlänge L im Flachwasser [m]

$$\frac{L}{T} = c = \sqrt{gh_m} \quad (5-91)$$

Für geotechnische Fragestellungen ist die Absinkzeit der Wellen von Interesse, für die überschläglich gilt:

Absinkzeit $t_{a,w}$ [s]

$$t_{a,w} \approx \frac{1}{2} T \quad (5-92)$$

- mit
- $t_{a,w}$ Absinkzeit einer Welle [s]

5.8 Wellenverformung

5.8.1 Allgemeines

Die bisher ermittelten Wellenhöhen gelten unter der Voraussetzung ungehinderter Ausbreitung. Dies trifft für die meisten Bemessungsfälle zu. In bestimmten Situationen unterliegt die Wellenfront vielen Störungen und Einflüssen (Einbauten, Wassertiefenänderungen, Anlaufwinkel), die die Wellenhöhe verändern. Daher muss dann die Umgebung des zu bemessenden Deckwerks mit ihren möglichen Auswirkungen auf die Wellenhöhe am Bemessungspunkt untersucht werden. Möglich sind **Wellenaufsteilen** und **-brechen** (s. 5.8.2), **Diffraktion** (s. 5.8.3), **Refraktion** (s. 5.8.4) und/oder **Reflexion** (s. 5.8.5) (Begriffe s. Kap. 2).

5.8.2 Wellenaufsteilen und -brechen

Das Aufsteilen einer Welle (s. Kap. 2) bei abnehmender Wassertiefe wird durch einen Aufsteilungskoeffizienten, genannt Shoaling-Koeffizient K_{sh} , beschrieben:

Wellenhöhe H_{sh} durch Aufsteilen [m]

$$H_{sh} = K_{sh} H_{ein} \quad (5-93)$$

$$K_{sh} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{4\pi h_m/L_{ein}}{\sinh(4\pi h_m/L_{ein})}\right) \tanh(4\pi h_m/L_{ein})}}$$

(5-94)

- mit
- h_m mittlere Wassertiefe [m]
 - H_{ein} Höhe der einfallenden Wellen [m]
 - H_{sh} Wellenhöhe infolge Wellenaufsteilen (wave shoaling) [m]
 - K_{sh} Shoaling-Koeffizient [-]
 - L_{ein} Länge der einfallenden Welle [m] ($L_{ein} = L$)

Am Verlauf des Shoaling-Koeffizienten (s. Bild 5.38) ist zu sehen, dass dem Aufsteilen der Welle im Flachwasserbereich zunächst eine Verminderung der Wellenhöhe im Übergangsbereich vorangeht.

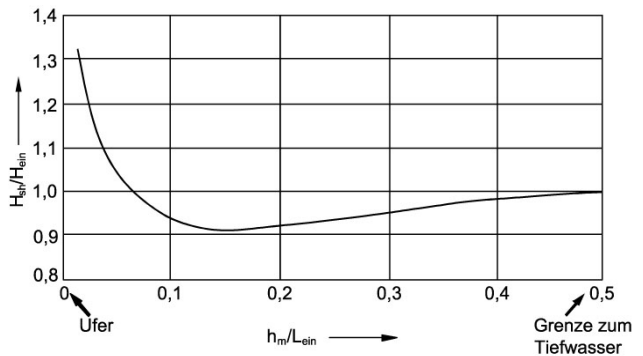


Bild 5.38 Verlauf des Shoaling-Koeffizienten K_{sh} mit abnehmender mittlerer Wassertiefe h_m

Für die Veränderung der Wellenlänge gilt:

Wellenlänge L_{sh} bei Aufsteilen [m]

$$\frac{L_{sh}}{L_{ein}} = \tanh\left(2\pi \frac{h_m}{L_{sh}}\right) \quad (5-95)$$

mit

L_{sh} Wellenlänge infolge von Wellenaufsteilen (engl.: wave shoaling) [m]

Durch die ständige Änderung von Wellenhöhe und -länge ändert sich auch die Steilheit der Welle. Sie wird durch folgende Formel beschrieben:

Wellensteilheit H_{sh}/L_{sh} [-]

$$\frac{H_{sh}}{L_{sh}} = \frac{H_{ein}}{L_{ein}} \cdot \frac{1 + \cosh(4\pi h_m/L_{sh})}{\sqrt{(4\pi h_m/L_{sh} + \sinh(4\pi h_m/L_{sh})) \tanh^2(2\pi h_m/L_{sh})}}$$

(5-96)

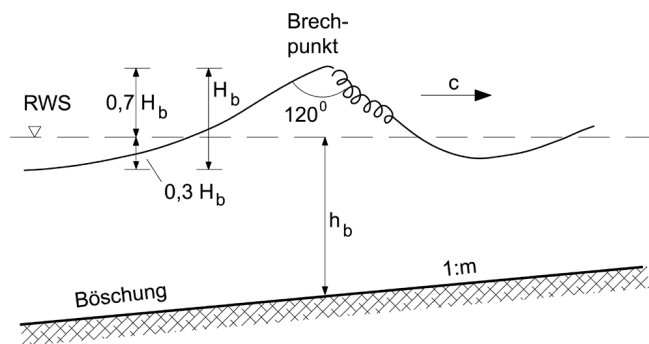


Bild 5.39 Prinzipskizze zur brechenden Welle
c - Wellengeschwindigkeit
h_b - Wassertiefe im Brechpunkt
H_b - Wellenhöhe im Brechpunkt
 maximaler Winkel am Wellenscheitel: 120°

Die obere Grenze der Wellensteilheit lässt sich nach folgender Formel bestimmen:

Obergrenze der Wellensteilheit H_{sh}/L_{sh} [-]

$$\left[\frac{H_{sh}}{L_{sh}} \right]_{max} = 0,142 \tanh \frac{2\pi h_m}{L_{sh}} \quad (5-97)$$

Wird diese Grenze überschritten, so bricht die Welle. Abhängig von der Böschungsneigung kommt es zu Brechertypen wie etwa Schwall-, Sturz- oder Reflexionsbrecher (s. Kap. 2) /Le Méhauté 1976; Press, Schröder 1966; SPM 1984/.

Da im Moment des Brechens ein Maximum an kinetischer Energie vorliegt, ist die Wellenhöhe im Brechpunkt H_b für Bemessungsfragen wichtig. Bei kleinen Anfangssteilheiten ($H_{ein}/L_{ein} < 0,006$) ergibt sie sich wie folgt:

Wellenhöhe H_b im Brechpunkt [m]

$$\frac{H_b}{H_{ein}} = 0,303 \sqrt[3]{\frac{L_{ein}}{H_{ein}}} \quad (5-98)$$

mit

H_b Wellenhöhe im Brechpunkt [m]

Für andere Anfangssteilheiten kann auf Bild 5.40 zurückgegriffen werden. Die Wassertiefe h_b im Brechpunkt kann nach Bild 5.41 abgeschätzt werden.

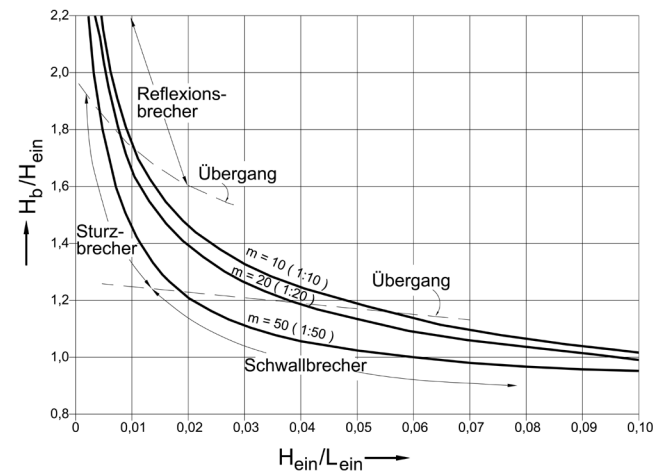


Bild 5.40 Wellenhöhe H_b im Brechpunkt abhängig von der Anfangssteilheit, nach ISPM 1977; EAK 2002/

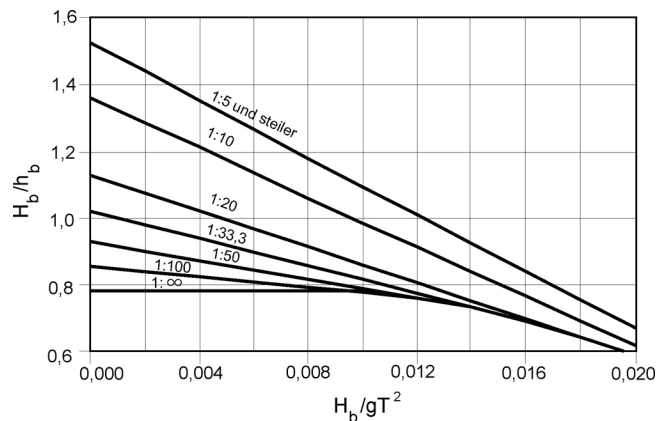


Bild 5.41 Wassertiefe h_b im Brechpunkt für $T = T_{ein} = konst$ nach ICM 2002/

Abhängig von Wellen- und Böschungsgeometrie ergibt sich eine Brecherkennzahl /Pilarczyk 1990/:

Brecherkennzahl ξ [-]

$$\xi = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_{\text{ein}} / L_{\text{ein}}}} \quad (5-99)$$

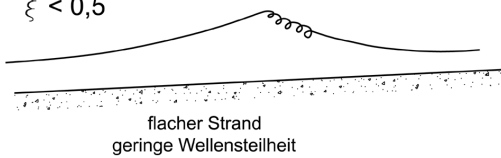
mit

- H_{ein} Höhe der einfallenden Welle [m]
- L_{ein} Länge der einfallenden Welle [m]
- β Böschungswinkel [°]
- ξ Brecherkennzahl [-]

Über die Brecherkennzahl lässt sich die Art des Brechers festlegen (s. Bild 5.42). Für die Bemessung ist entweder der Brecher mit der größten Wellenhöhe oder der mit der größten Wellensteilheit wichtig. Der Zusammenhang zwischen Böschungsneigung, Brecherkennzahl und Brecherform ist in Tabelle 5.2 zu sehen. Die Bezeichnungen, die im deutschen Schrifttum nicht einheitlich sind, wurden gemäß gängigen Empfehlungen /EAK 1993; EAK 2002; EAU 1996/ gewählt.

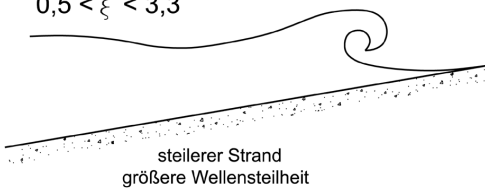
Schwallbrecher (spilling breaker)

$$\xi < 0,5$$



Sturzbrecher (plunging breaker)

$$0,5 < \xi < 3,3$$



Reflexionsbrecher (surging breaker)

$$\xi > 3,3$$

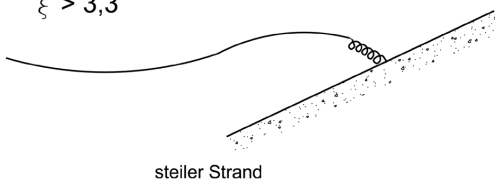


Bild 5.42 Brecherformen abhängig von der Brecherkennzahl, nach /CEM 2002; EAK 2002/ für Böschungsneigungen 1:5 - 1:20

Böschungsneigung	Brecherkennzahl	Brecherart
1 : 5 bis 1 : 20	$\xi < 0,5$	Schwallbrecher
	$0,5 < \xi < 3,3$	Sturzbrecher
	$\xi > 3,3$	Reflexionsbrecher
1 : 1,5 bis 1 : 4	$\xi < 2,5$	Schwallbrecher
	$2,5 < \xi < 3,4$	Sturzbrecher
	$\xi > 3,4$	Reflexionsbrecher

Tabelle 5.2 Brecherart abhängig von Böschungsneigung und Brecherkennzahl

5.8.3 Diffraktion

Die Änderung der Wellenhöhe infolge Diffraktion (s. Kap. 2) an Hindernissen oder Bauwerken (Leitwerk, Buhne o. ä.; s. Bild 5.43) wird mit einem Diffraktionskoeffizienten erfasst:

Wellenhöhe H_{diff} infolge Diffraktion [m]

$$H_{\text{diff}} = K' H_{\text{ein}} \quad (5-100)$$

mit

- H_{diff} Wellenhöhe infolge Diffraktion [m]
- K' Diffraktionskoeffizient [-]

Für die Praxis liegen Diffraktionsdiagramme vor, in denen Linien gleicher K' -Werte dargestellt sind (s. Bild 5.44 und Bild 5.45). Damit lässt sich die Wellenhöhe hinter Hindernissen (z. B. Bühnenfeld) abschätzen. Zu beachten ist, dass es auch zu lokalen Vergrößerungen der Wellenhöhen kommen kann. Bei üblichen Winkeln zwischen Schiffswelle und Buhne liegt die Erhöhung bei etwa 10 % (s. Bild 5.44). Wellen, die parallel auf Leitwerksöffnungen treffen und dort diffraktiert werden, können sich um ca. 20 % erhöhen (s. Bild 5.45). Entspricht die tatsächliche Wellenanlaufrichtung nicht der in den Bildern gezeigten, so kann auf weitere Diagramme in der Literatur zurückgegriffen werden /CEM 2002; Daemrich 1978a; Daemrich 1978b; SPM 1984/.

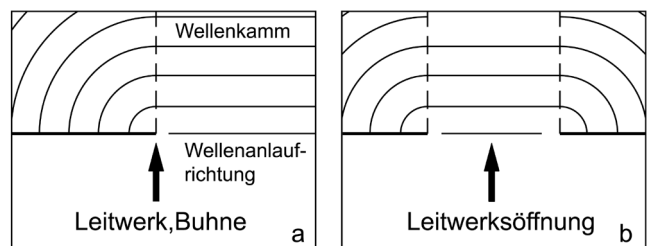


Bild 5.43 Anordnungen von (a) Bühnen und (b) Leitwerksöffnungen, die Diffraktion hervorrufen

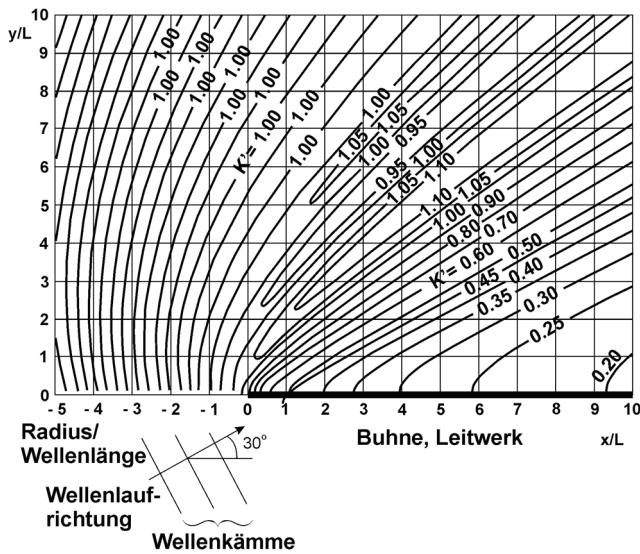


Bild 5.44 Diffractionsdiagramm der Wellenausbreitung an einem halbunendlichen Hindernis (Buhne, Leitwerk) bei konstanter mittlerer Wassertiefe h_m unter schrägem 30° -Wellenangriff, nach /Daemrich 1978b/

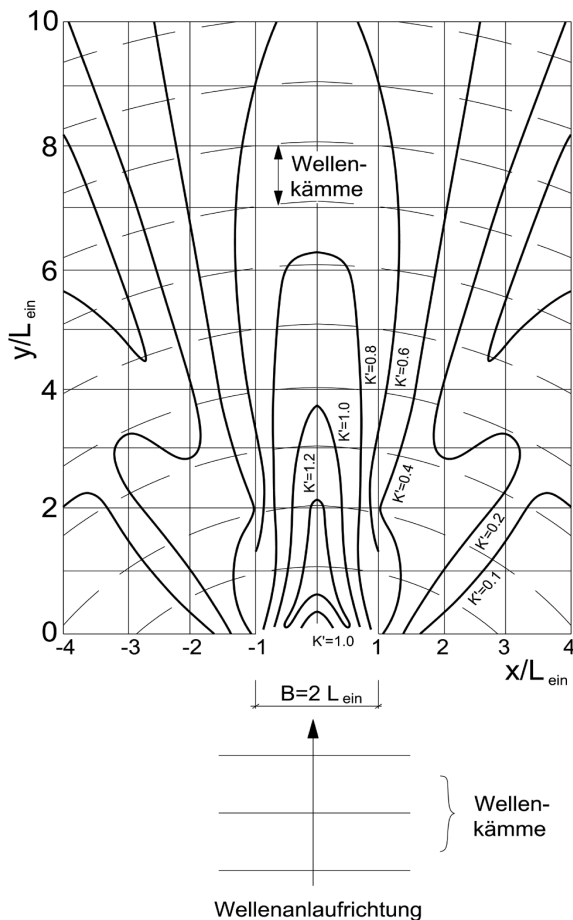


Bild 5.45 Diffractionsdiagramm der Wellenausbreitung hinter einer Leitwerksöffnung der Breite B bei konstanter mittlerer Wassertiefe h_m für $B/L_{ein} = 2$ unter parallelem Wellenangriff, nach /SPM 1984/

5.8.4 Refraktion

Trifft z. B. die Front einer schiffserzeugten Sekundärwelle schräg auf eine Uferlinie, so kommt es zur Refraktion (s. Kap. 2). Eine Seite des Wellenkamms befindet sich in geringerer Wassertiefe als die andere. Da bei Flachwasserwellen die Wellengeschwindigkeit mit der Wassertiefe abnimmt, läuft der ufernähere Wellenflügel langsamer als der uferferne. Der Wellenkamm erfährt insgesamt eine Ablenkung zum Ufer, und die Höhe schiffserzeugter Wellen nimmt im Kanal durch die Refraktion ab (s. Bild 5.46). Hierbei ist zu beachten, dass infolge des Aufsteilens (s. 5.8.2) die Wellenhöhe dennoch ansteigen kann. Es sind immer alle Wirkungen gleichzeitig zu beachten.

Die Wellenverformung infolge Refraktion kann nur sehr aufwändig graphisch oder numerisch ermittelt werden. Wird sie bei der Bemessung nicht berücksichtigt, wird auf der sicheren Seite dimensioniert, weil die Höhe der refraktierten Welle kleiner als die der einfallenden ist.

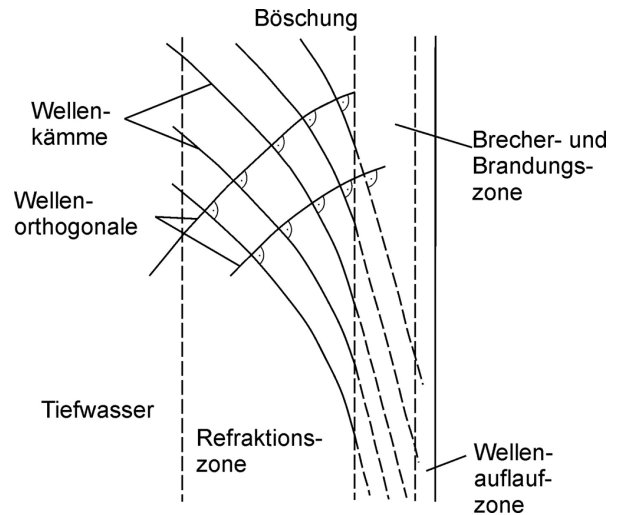


Bild 5.46 Schema der Refraktion schiffserzeugter Wellen

5.8.5 Reflexion

Trifft eine Welle auf eine Grenzfläche (Wand, Buhne, Leitwerk, Steilufer u. ä.), so wird sie dort teilweise zurückgeworfen. Dies wird als Reflexion bezeichnet (s. Kap. 2). Durch Verluste an Wellenenergie verringert sich die Wellenhöhe ($H_{refl} < H_{ein}$), was durch den Reflexionskoeffizienten beschrieben wird:

Wellenhöhe H_{refl} infolge Reflexion [m]

$$H_{refl} = K_{refl} H_{ein} \quad 0 \leq K_{refl} \leq 1 \quad (5-101)$$

mit

H_{refl} Wellenhöhe infolge Reflexion [m]

K_{refl} Reflexionskoeffizient [-]

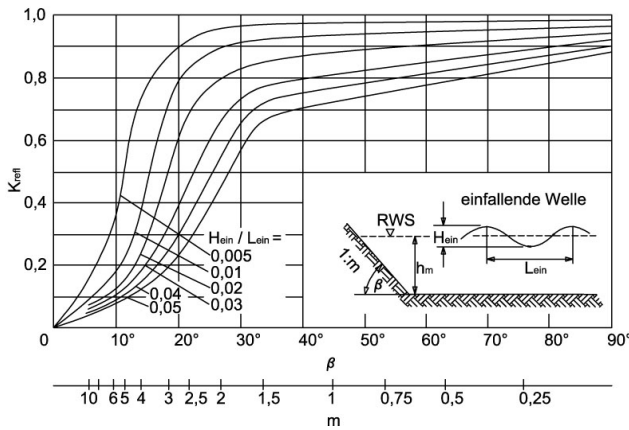


Bild 5.47 Reflexionskoeffizient K_{refl} abhängig von mittlerer Wassertiefe sowie Wellenhöhe und -länge der einfallenden Welle für Flachwasserwellen und geneigtes Hindernis, nach IPress, Schröder 1966/

Die reflektierten Wellen überlagern sich mit den einfallenden. Beim Grenzfall $K_{refl} = 1$ (senkrecht Hindernis) findet Totalreflexion statt; bei $K_{refl} = 0$ (flaches Ufer) hingegen gibt es keine Reflexion (Wellenenergie beim Brechen verbraucht). Für Flachwasserwellen, die auf geneigte Hindernisse auftreffen, lässt sich K_{refl} aus Bild 5.47 abschätzen.

5.8.6 Wellenauflauf

Als Wellenauflaufhöhe von Wind- und Sekundär-schrägwellen wird die vertikal gemessene Höhe z_{AL} über dem Ruhewasserspiegel (RWS) bis zum höchsten erreichten Auflaufpunkt auf der Böschung definiert.

Sie ist am größten, wenn die Ausbreitung der Wellen senkrecht zum Ufer (Wellenkämme parallel zum Ufer) erfolgt. Mit zunehmendem Winkel β_W zwischen Ausbreitungsrichtung und Ufernormaler nimmt die Auflaufhöhe ab (s. 5.8.6.1).

Bei uferparalleler Ausbreitung, wie dies bei den schiffserzeugten Heckquerwellen der Fall ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Wellenhöhe am Ufer erhalten bleibt. Hierbei ist für Sekundärwellen deren asymmetrische Form zu beachten. Die größte Wasserspiegelerhebung über dem RWS ist dabei größer als die halbe Wellenhöhe. Sie wird im Folgenden auch als Auflaufhöhe bezeichnet (s. 5.8.6.2).

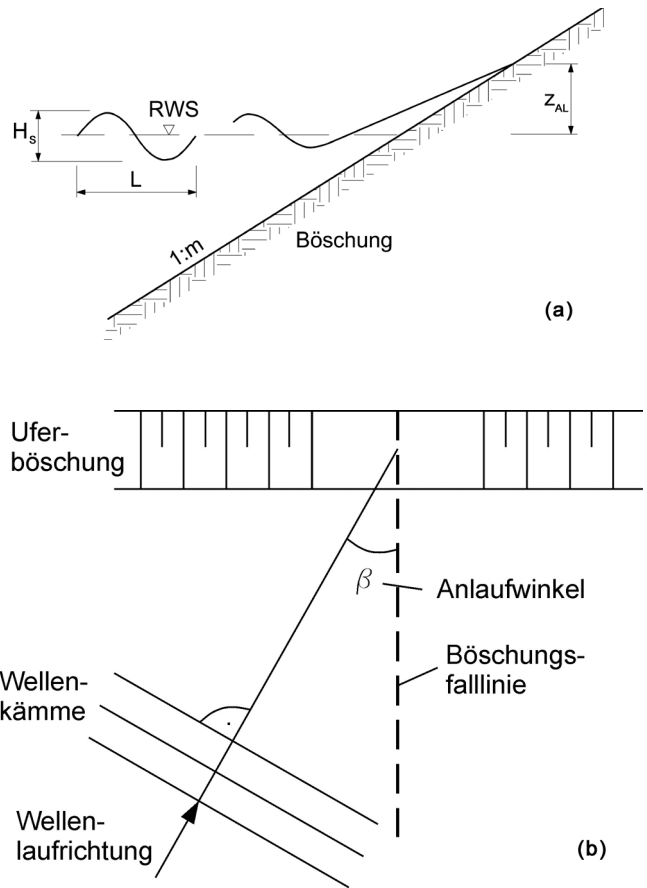


Bild 5.48 Definitionen zur Wellenauflaufhöhe z_{AL} : (a) Querschnitt, (b) Draufsicht

Für die Ermittlung der Auflaufhöhe stehen eine Vielzahl empirischer Formeln zur Verfügung, die je nach Entwicklung Wellenhöhe, -länge und -periode, Böschungsneigung und -profil (konkav/konvex) sowie Wassertiefe beinhalten.

5.8.6.1 Auflaufende Wellen

Allgemein gilt, dass die Auflaufhöhe mit der Zunahme von Hohlraumgehalt und Oberflächenrauheit der Böschung abnimmt, mit steiler werdender Böschung, zunehmender Wellenhöhe und Wellenperiode aber zunimmt.

In /CUR-TAW 1992/ wird eine Formel für den Wellenauflauf angegeben, die auch den Winkel zwischen Wellenfront und Böschung sowie die Oberflächenrauheit des Deckwerks berücksichtigt:

Wellenauflaufhöhe z_{AL} [m] von Schrägwellen

$$z_{AL} = C_A \cos \beta_W f_{red} \frac{1}{m} T \sqrt{g H_S} \geq \frac{H_S}{2} \quad (5-102)$$

- mit
- C_A Konstante für den Wellenauflauf [-]
 $C_A = 0,4$ für regelmäßige Wellen und Schiffswellen /EAK 1993/
 $C_A = 0,74$ für unregelmäßige Windwellen /CUR-TAW 1992/
- f_{red} Reduktionsfaktor für Energieverluste beim Wellenauflauf [-] (s. Tabelle 5.3)
- H_S Bemessungswellenhöhe [m]
 Maximalwert der Sekundärwellenhöhe nach Gl. (5-43) in 5.5.5.2 (Schrägwellen) und Gl. (5-52) in 5.5.5.4 unter Beachtung von Gl. (5-50) in 5.5.5.3 sowie der Windwellenhöhe nach 5.7.5
- m Böschungsneigung [-]
- T mittlere Wellenperiode [s]
- β_W Anlaufwinkel zwischen Wellenkammorthogonaler und Böschungsfalllinie [°] (s. Bild 5.48)
 Beachte: $\beta_W \approx 55^\circ$ gilt für Schrägwellen des Sekundärwellensystems bei ufernaher Fahrt und $Fr_h < 0,7$ (in grober Näherung auch bis $Fr_h = 0,8$)
- z_{AL} Wellenaufbauhöhe [m]
- g Erdbeschleunigung [m/s^2]

Die Formel gilt für Böschungsneigungen bis $m = 3$ (1:3) und Anlaufwinkel bis etwa 55° . Eine ähnliche Formel, die mehr Eingangsparameter berücksichtigt, wird in /EAK 2002/ genannt. Das Ergebnis ist auch ein Anhaltswert für den auflaufbedingten Anteil des Freibords (Abstand RWS - Böschungskrone). Damit ist eine ausreichende Sicherheit gegen Überströmen gegeben. Statistisch wird der berechnete Wellenaufbau nur von 2 % aller Wellen überschritten.

Weist die Böschung eine Berme auf, so wird zur Berechnung des Wellenaufbaus auf weiterführende Literatur verwiesen /Przedwojski et al. 1995/.

Die Zunahme von Oberflächenrauheit und Hohlraumanteil der Böschungsoberfläche reduziert den Wellenaufbau erheblich, was durch einen Reduktionsfaktor f_{red} erfasst wird (s. Tabelle 5.3). Für natürliche Böschungen muss f_{red} an Hand der Angaben der Tabelle 5.3 abgeschätzt werden.

Bei Böschungssicherungen aus geschütteten Stein- und Kornmaterialien nimmt die Wellenaufbauhöhe schiffserzeugter Wellen in Abhängigkeit vom Hohlraumanteil des Deckwerks nach /Abromeit 1997/ wie folgt ab:

$$z_{AL,St} = \frac{H_S - d_D n}{H_S} z_{AL,0} \geq 0 \quad (5-103)$$

- mit
- d_D Deckschichtdicke [m]
- H_S Bemessungswellenhöhe [m]
- n Hohlraumanteil [-]
- $z_{AL,St}$ Wellenaufbauhöhe auf Steinschüttungen [m]
- $z_{AL,0}$ Wellenaufbauhöhe für $f_{red} = 1$ [m]

Eine Grobkiesfilterlage oder eine gleichwertige Schicht darf der Deckschicht hinzugerechnet werden.

Deckwerk	Reduktionsfaktor f_{red}
glatt, geschichtet	1
Betonformsteine	0,9
Böschungsschutz durch z.B. Basaltblöcke, Steinblöcke oder Grasbewuchs	0,85 - 0,9
eine Lage Steinschüttung auf undurchlässigem Untergrund	0,8
gesetzte Steine	0,75 - 0,8
geschüttete runde Steine	0,6 - 0,65
geschüttete Bruchsteine	0,5 - 0,6
geschüttete Bruchsteine mit Teilverguss (*)	0,6 - 0,9

Tabelle 5.3 Reduktionsfaktor f_{red} für den Wellenaufbau für verschiedene Deckschichtbauweisen, nach /CUR-TAW 1992/ und ergänzt (*)

5.8.6.2 Parallel laufende Wellen

Die Aufbauhöhe nach Gln. (5-102) bzw. (5-103) ist für große β_W nach unten begrenzt. Für den Grenzfall $\beta_W = 90^\circ$ (Querwellen bei uferparalleler Fahrt) gilt:

Wellenaufbauhöhe z_{AL} [m] von parallel laufenden Wellen

$$z_{AL} \geq \Delta H_{S,oWl} \approx \frac{\pi H_S^2}{8 \lambda_q} \frac{\cosh \frac{2\pi h}{\lambda_q}}{\left(\sinh \frac{2\pi h}{\lambda_q} \right)^3} \left[2 + \cosh \left(\frac{4\pi h}{\lambda_q} \right) \right] + \frac{H_S}{2} \quad (5-104)$$

- mit
- h örtliche Wassertiefe $\approx H_S$ im Brechpunkt am Ufer [m]
- $\Delta H_{S,oWl}$ Wellenhöhenanteil oberhalb der Wasserlinie [m]

- H_S Bemessungswellenhöhe [m]
Größtwerter der Sekundärwellenhöhen nach 5.5.5.2, Gl. (5-43) (Bug- und Heckschrägwellen), Gl. (5-47) (Heckquerwellen) und nach 5.5.5.4, Gl. (5-52) (Schräg- und Heckwellen kleiner, schneller Boote) unter Beachtung von Gl. (5-50) (aus 5.5.5.3)
- Z_{AL} Wellenaufbauhöhe [m]
- λ_q Wellenlänge der Querwellen [m] nach 5.5.5.1, Gl. (5-42)

5.8.7 Wellenhöhenänderung bei Übergang eines senkrechten Ufers auf ein Böschungsdeckwerk

Beim Übergang eines senkrechten Ufers auf ein Böschungsdeckwerk muss eine Sonderform der Reflexion, die Mach-Reflexion, beachtet werden. Wellenfronten, die annähernd rechtwinklig am senkrechten Ufer entlanglaufen, führen infolge dieser Reflexion zur Wellenerhöhung, die im ungünstigsten Fall ca. das Zweifache der einfallenden Wellenhöhe betragen kann. Diese Wellen treffen auf das anschließende geböschte Ufer und sind dort noch ein Stück weit wirksam. Dies muss konstruktiv berücksichtigt werden (s. 6.13).

5.9 Sonstige Wellen

5.9.1 Allgemeines

Weitere Ursachen von Wasserstandsschwankungen können langperiodische Vorgänge (Schwall- und Sunkwellen, Tidewellen, Hochwasserwellen) sein. Je nach Bemessungssituation und Fragestellung müssen diese Wellen mit denen aus anderen Ursachen (Wind, Schiff) additiv überlagert werden.

Für die geotechnische Bemessung sind für die hier behandelten Wellen die Absunkgeschwindigkeiten gesondert zu ermitteln.

5.9.2 Schwall- und Sunkwellen

Schwall- und Sunkwellen entstehen infolge der verschiedensten Betriebsvorgänge:

- Turbinenanfahren oder -schnellschluss (stauge-regelte Flüsse)
- Schleusungen (staugeregelte Flüsse, Kanäle)
- Inbetriebnahme oder Abschaltung von Kraftwerkskühlung (freifließende Gewässer)
- plötzlicher Eintrag von Vorflut (freifließende Gewässer)
- Staulegungen

Bei der Ermittlung solcher Schwall- und Sunkwellen sind bei den entsprechenden Verursachern (Wasserkraftwerks- und Schleusenbetreiber, thermische Kraftwerke, Klärwerke; auch indirekt an einmündenden Gewässern) Angaben zu Größe, Dauer und Häufigkeit der zu erwartenden Abflussschwankungen einzuholen. Um extreme Schwall- und Sunkvorgänge zu vermeiden, wird der Schleusungsabfluss meist auf 70 - 90 m³/s begrenzt /EAU 1996/.

Die Ermittlung der Wasserspiegeländerung infolge einer einzelnen Schwall- und Sunkwelle kann nach /EAU 1996/ erfolgen. Mit einer Wellenfortschrittsgeschwindigkeit

$$c = \sqrt{g h_m} \tag{5-105}$$

mit

- c Wellenfortschrittsgeschwindigkeit, Stauwellengeschwindigkeit [m/s]
- g Erdbeschleunigung [m/s²]
- h_m mittlere Wassertiefe [m]

für kleine Verhältnisse $\Delta h / h_m$ lässt sich die Wasserspiegelanhebung/-absenkung Δh überschlägich ermitteln:

Wasserspiegelanhebung/-absenkung Δh infolge von Schwall und Sunk [m]

$$\Delta h = \pm \frac{\Delta Q}{c b_m} \tag{5-106}$$

mit

- b_m mittlere Wasserspiegelbreite [m] im Bereich der Wasserspiegelanhebung/-absenkung
- $b_m = b_{WS} \pm m \Delta h$
- b_{WS} Wasserspiegelbreite [m]
- m Böschungsneigung [-]
- ΔQ plötzliche Abflussänderung [m³/s]
- Δh Wasserspiegelanhebung/-absenkung [m]

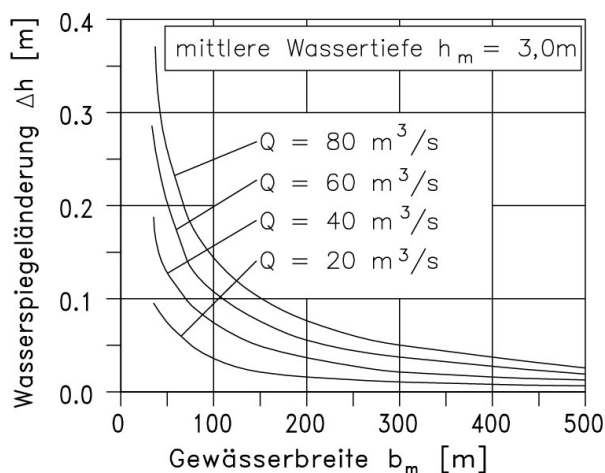


Bild 5.49 Wasserspiegeländerungen infolge Schwall und Sunk für eine mittlere Wassertiefe von 3,0 m, abhängig von der Wasserspiegelbreite für verschiedene Abflussänderungen ΔQ

Für eine mittlere Wassertiefe von 3,0 m, die etwa im Regeltrapezprofil vorliegt, wurden die o. g. Gleichungen beispielhaft ausgewertet (s. Bild 5.49).

Durch Reflexionen und überlagerte nachfolgende Schwall- und Sunkwellen kann sich die ermittelte Wellenhöhe vergrößern oder verkleinern. Dämpfungseffekte sind bei gleichmäßigen Kanalquerschnitten, gerader Linienführung und glatter Auskleidung gering. Vor allem bei kurzen Stauhaltungen können diese Wellen deshalb mehrmals hin- und herlaufen.

Die zeitlichen Entwicklungen der Abflussänderungen sind nach den Schleusenfüllungs- und -entleerungsgesetzen bzw. nach den Turbinenanfahr- oder -abschaltzeiten abzuschätzen.

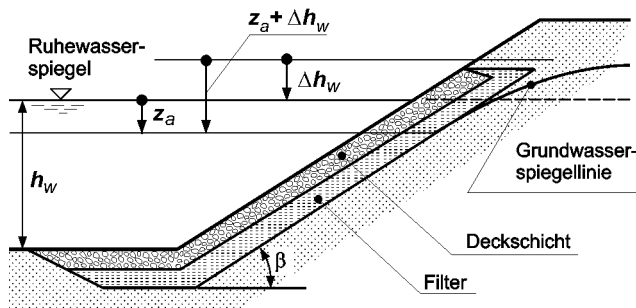


Bild 5.50 Bestimmung des maßgebenden Absunkmaßes nach Aufsättigung des Bodens bzw. Anstieg des Grundwassers um Δh_w über dem Ruhewasserspiegel
 h_w Wassertiefe im Ruhezustand (RWS)
 Δh_w temporärer Wasserspiegelanstieg
 z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsink unter RWS

5.9.3 Hochwasserwellen

Bedingt durch Jahreszeiten und Wetter entstehen Hochwasserwellen, deren Höhe, Dauer und Häufigkeit stark unterschiedlich sein können. Diese Werte werden beeinflusst von Entstehungsort und -geschichte sowie der Laufstrecke der jeweiligen Welle. Generelle Aussagen lassen sich also nicht machen. In Stauhaltungen kann in Sonderfällen ein schnelles Absinken der Hochwasserwelle zusätzlich bemessungsrelevant sein (Köhler 1997).

Zur Ermittlung der Fallgeschwindigkeit des Wasserspiegels v_{za} sind Erkundigungen bei den zuständigen Behörden einzuziehen (z. B. Pegelaufzeichnungen).

Die Porenwasserdrücke im Boden können bei Ablauf eines Hochwassers je nach Durchlässigkeit des Bodens ufernah deutlich über dem hydrostatischen Ruhewasserspiegel liegen (s. Bild 5.50).

Der Unterschiedsbetrag Δh_w zwischen Grundwasser und Ruhewasserspiegel muss bei der geotechnischen Bemessung berücksichtigt werden.

Für die Bestimmung des maßgebenden Grundwasserstandes sind die örtlichen Erfahrungen und langjährige Grundwasserbeobachtungen heranzuziehen. Der genaue Wert von Δh_w ist aus dem Schnittpunkt der Grundwasserspiegellinie mit der jeweiligen untersuchten Bruchfuge zu bestimmen.

5.10 Porenwasserüberdruck in Abhängigkeit vom schnellen Wasserspiegelabsink z_a

5.10.1 Allgemeines

Für die geotechnische Bemessung eines durchlässigen Deckwerks in Kap. 7 werden folgende Eingangsparameter benötigt:

- Maximaler schneller Absink des Wasserspiegels z_a und zugehörige Absinkgeschwindigkeit v_{za}
- Maximaler Porenwasserüberdruck in der Tiefe der kritischen Bruchfuge d_{krit} in Abhängigkeit von z_a und v_{za} .

5.10.2 Maximaler Wasserspiegelabsink z_a und Absinkgeschwindigkeit v_{za}

Der schnelle Wasserspiegelabsink z_a kann nach den Rechenverfahren bzw. Hinweisen in dieser Schrift für folgende Fälle ermittelt werden:

- für Schiffsverkehr (s. 5.5.4)
- für Windwellen (s. 5.7)
- für Schwall und Sunk (s. 5.9.2)
- für Hochwasserwellen (s. 5.9.3)

Der für die Bemessung maßgebende maximale Wasserspiegelabsink z_a ist für den ungünstigsten

Fall der Überlagerung der Absunkereignisse entsprechend der Hinweise in 4.3 zu ermitteln.

Hinweise zur Absunkgeschwindigkeit v_{za} werden in folgenden Abschnitten gegeben:

- für Schiffsverkehr (Primärwelle)(s. 5.5.4.7)
- für Windwellen und Sekundärwellen aus Schiffsverkehr (s. 5.5.4.7)
- für Schwall und Sunk (s. 5.9.2)
- für Hochwasserwellen (s. 5.9.3)

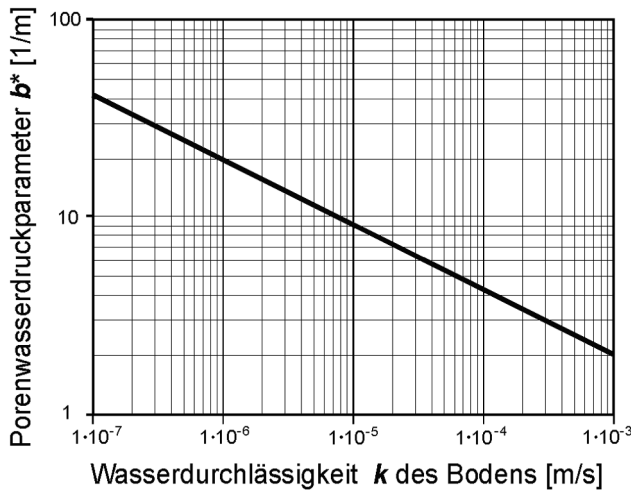


Bild 5.51 Porenwasserdruckparameter b^* in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des Bodens k für eine Absunkgeschwindigkeit $v_{za} = 0,12$ m/s /Köhler 1997/ bzw. eine Absunkzeit von $t_a^* = 5$ s

5.10.3 Größe des Porenwasserüberdrucks Δu

Der Porenwasserüberdruck Δu als Folge eines schnellen Wasserspiegelabsunks lässt sich in Abhängigkeit von der Tiefe z unter der Böschung bzw. Gewässersohle als Eingangsgröße für die geotechnische Bemessung eines durchlässigen Deckwerks nach folgender Gleichung bestimmen /Köhler 1989/:

Porenwasserüberdruck Δu [kN/m²]

$$\Delta u(z) = \gamma_w z_a (1 - a e^{-bz}) \quad (5-107)$$

mit

- a Porenwasserdruckparameter [-]
 $a = 1$, soweit sich nicht aus der mathematischen Beschreibung von Messergebnissen andere Werte ergeben

- b Porenwasserdruckparameter [1/m] abhängig von Absunkzeit (s. 5.5.4.7) und Durchlässigkeit (s. auch Bild 5.51)
- e Eulersche Konstante [-]
 $e \approx 2,718$
- z Tiefe unterhalb der Böschungsoberfläche [m] bzw. unterhalb der Gewässersohle, normal zum Gewässerbett
- z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsunk [m]
 $z_a = H_{u,Bug}$ maßgebender Bugabsunk (inklusive Wasserspiegelanspannung vor dem Bug und ggf. langwelligen Anteilen des Bugstaus) nach Gl. (5-31) (s. auch Bild 5.51)
 $z_a = H_{u,H}^*$ maßgebender Heckabsunk nach Gl. (5-41) (s. auch Bild 5.18) zugehörige Absunkzeit t_a
 → beim Bugabsunk nach Gln. (5-36) und (5-37)
 → beim Heckabsunk nach Gl. (5-40)
 → bei Sekundärwellen nach Gln. (5-38) und (5-39)

γ_w Wichte des Wassers [kN/m³]
 $\gamma_w = \rho_w g$

ρ_w Dichte des Wassers [kg/m³]

Der Porenwasserdruckparameter b ist ein Maß für die Abnahme des Porenwasserüberdrucks Δu mit der Tiefe. Der Kehrwert des b -Werts entspricht in etwa derjenigen Tiefe z_h , in der Δu auf die Hälfte seines maximalen Werts ansteigt (s. Bild 3.4). Exakt gilt:

$$b = \frac{\ln 2}{z_h} \quad (5-108)$$

Dies bedeutet, je größer b ist, desto kleiner ist die Tiefe z_h bzw. desto größer ist der Porenwasserüberdruck Δu in einer vorgegebene Tiefe im Untergrund und desto stärker ist seine destabilisierende Wirkung auf das Deckwerk.

Der Porenwasserdruckparameter b kann in Abhängigkeit von der Wasserdurchlässigkeit des Bodens k für eine Absunkzeit $t_a = t_a^* = 5$ s nach Bild 5.51 bestimmt werden. Dieser wird nachfolgend als b^* bezeichnet. Weitere Einflussgrößen wie der Steifemodul E_s und der Sättigungsgrad S des Bodens sind in Bild 5.51 berücksichtigt /Köhler 1997/. Die Umrechnung von b^* auf ein b bei einer anderen Absunkzeit $t_a \neq 5$ s kann durch den Faktor $\sqrt{t_a^*/t_a}$ erfolgen:

$$b = b^* \sqrt{\frac{t_a^*}{t_a}} \quad (5-109)$$

mit

b Porenwasserdruckparameter [1/m]

b^* Porenwasserdruckparameter [1/m] nach Bild 5.51 für

$$t_a = t_a^* = 5 \text{ s}$$

t_a Absinkzeit [s] nach 5.5.4.7

$t_a = t_{a,B}$ nach Gl. (5-36) - (5-39), wenn die Bugwelle bemessungsrelevant ist

$t_a = t_{a,H}$ nach Gl. (5-40) wenn der Heckabsink bemessungsrelevant ist

Mit Gl. (5-109) ergeben sich für größere Absinkzeiten $t_a > 5 \text{ s}$ kleinere b -Werte, umgekehrt für kleinere Absinkzeiten $t_a < 5 \text{ s}$ größere b -Werte.

Im Zweifelsfall ist der b -Wert aus Porenwasserüberdruckmessungen zu bestimmen.

6 Hydraulische Bemessung ungebundener Deckschichten aus Wasserbausteinen

6.1 Allgemeines

Der hydraulischen Bemessung von ungebundenen Deckschichten aus Wasserbausteinen sind die Wellen- und/oder Strömungseinwirkungen nach Kap. 5 zu Grunde zu legen.

Aus Erfahrungen und Modellversuchen ist bekannt, dass die Erosionsfestigkeit einer ungebundenen Deckschicht aus Wasserbausteinen gegenüber Wellen- und Strömungseinwirkungen von folgenden Parametern beeinflusst wird:

- Steingewicht bzw. Steingröße (Korngröße) und Trockenrohdichte
- Einbaudicke der Steine
- Porengröße und Einbaudicke des Unterbaues

Viele Bemessungsansätze für Deckschichten aus geschütteten Steinen, die Wellen- oder Strömungsbelastungen ausgesetzt sind, gehen von der Ermittlung des erforderlichen mittleren Steingewichts G_{50} aus (s. Bild 6.1), das sich als ein maßgebender Parameter für die Erosionsfestigkeit einer Steinschüttung erwiesen hat [Dietz 1973; Fuehrer, Römisch 1985; Hudson 1959].

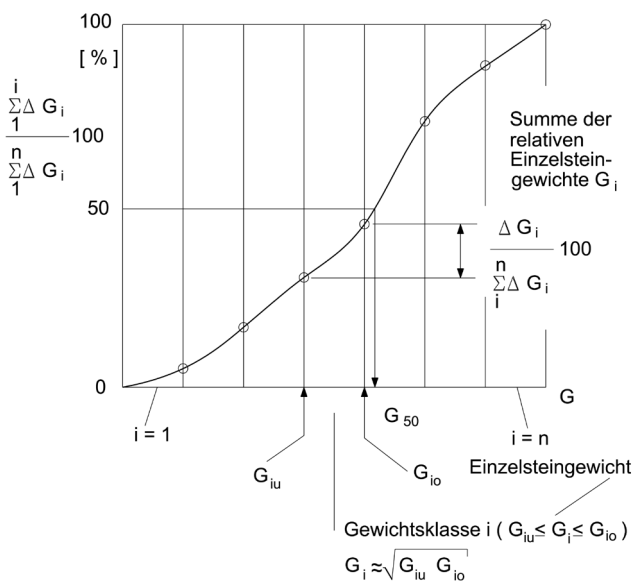


Bild 6.1 Zur Definition des mittleren Steingewichts G_{50}

Die zugehörige Steingröße wird aus G_{50} mit der gewählten Trockenrohdichte zunächst als sogenannte nominale Steingröße D_{n50} ermittelt, was der Kantenlänge eines Würfels mit dem Gewicht G_{50} entspricht.

$$D_{n50} = \left(\frac{G_{50}}{\rho_S} \right)^{1/3} \quad (6-1)$$

mit

G_{50} Gewicht [kg] beim 50%-Wert der Summenhäufigkeitslinie der Steingewichte, siehe Bild 6.1

ρ_S Dichte der Wasserbausteine [kg/m³]

Andere Bemessungsansätze verwenden Siebkorn-durchmesser, zum Beispiel D_{50} oder D_{85} . Die hier angegebenen Bemessungsgrößen beziehen sich auf eine Siebung mit Quadratlöchern. Die Korngröße D_x ist dabei gemäß Bild 6.2 definiert.

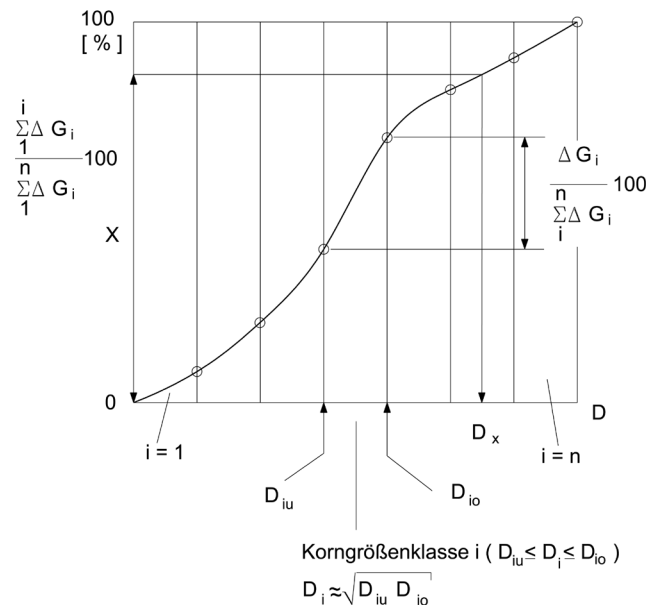


Bild 6.2 Zur Definition der Korngröße D_x
Erläuterung: ΔG_i entspricht dem Gewichtsanteil einer Siebprobe, der durch das Sieb mit D_{io} fällt und auf dem Sieb mit D_{iu} liegen bleibt

Die meist verwendeten Kenngrößen D_{n50} und D_{50} sind näherungsweise über den Formfaktor SF miteinander verknüpft:

$$D_{n50} \approx SF^{1/3} D_{50} \quad (6-2)$$

$$SF = \frac{c}{\sqrt{ba}}$$

mit

- a größte Abmessung eines Wasserbausteins [m] nach Bild 6.3
- b mittlere Abmessung eines Wasserbausteins [m] nach Bild 6.3
- c kleinste Abmessung eines Wasserbausteins [m] nach Bild 6.3
- D_{50} Korndurchmesser bei 50% Siebdurchgang [m]
- D_{n50} nominale Steingröße [m] (Korndurchmesser)
- SF Formfaktor [-]
 $0,5 \leq SF \leq 0,8$ Wasserbausteine nach /TLW/
 $SF = 0,65$ typischer Mittelwert für Wasserbausteine

Zum Zusammenhang zwischen nominalem Steindurchmesser D_{n50} und Steinlänge nach /TLW/ wird auf 6.9 verwiesen.

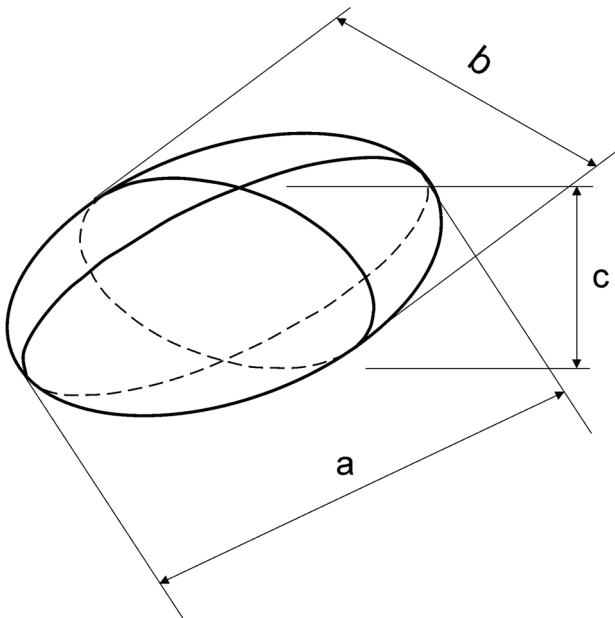


Bild 6.3 Zur Definition der Abmessungen a, b und c eines Wasserbausteins

6.2 Steingröße bei Belastung durch Heckquerwellen

Für die Normalfahrt kann der für die Lagestabilität mindestens erforderliche mittlere Steindurchmesser D_{50} des Deckschichtmaterials von Böschungssicherungen für die maximale Höhe aller Heckquerwellen mit folgender Gleichung bemessen werden:

Steingröße D_{50} aus Heckquerwellen [m]

$$D_{50} \geq \frac{H_{Bem}}{B'_B \left(\frac{\rho_S - \rho_W}{\rho_W} \right) m^{1/3}} \quad (6-3)$$

mit

- B'_B Stabilitätsbeiwert [-], aus Naturversuchen /BAW 2004/ abgeleitet
 $B'_B = 1,5$ (untere Grenze der Messwerte) -
 $2,3$ (Mittelwert der Messwerte)
 Für die Bemessung wird empfohlen:
 $B'_B = 1,5$ bei häufigem Auftreten des Bemessungsfalls und/oder wenn Deckwerksschäden möglichst vollständig vermieden werden sollen
 $B'_B = 2,3$ bei geringer Häufigkeit des Bemessungsfalls und/oder wenn ein begrenzter Unterhaltungsaufwand in Kauf genommen wird
- D_{50} erforderliche Steingröße (Siebkorndurchmesser) bei 50 % Siebdurchgang [m]
- H_{Bem} Bemessungswellenhöhe [m]
 Maximalwert von $H_{u,Heck}$ bzw. $H_{Sek,q}$
 $H_{u,Heck}$ Heckwellenhöhe des Primärwellensystems nach 5.5.4.4, Gl. (5-32) sowie Bild 5.13
 $H_{Sek,q}$ reine Heckquerwellenhöhe des Sekundärwellensystems nach 5.5.5.2, Gl. (5-47), begrenzt durch Gl. (5-50)

- m Böschungswinkel $m = \cot \beta$ [-]
 $2 \leq m \leq 5$
 Beachte: hier nicht $m_{K,äqui}$ verwenden, sondern die tatsächliche Böschungswinkel m_{rs} bzw. m_{lks}
- β Böschungswinkel [°]
- ρ_W Dichte des Wassers [kg/m^3]
- ρ_S Dichte der Wasserbausteine [kg/m^3]
 Beachte: aktuelle /TLW/

Die Bemessungsformel wurde in Anlehnung an die Hudson-Formel zur Bemessung der Steingrößen bei auflaufenden Wellen entwickelt. Dort beeinflusst die Böschungswinkel sowohl den Brechertyp als auch die Ablaufgeschwindigkeit der Welle, die die größte Belastung ergibt. Für die i. d. R. parallel zum Ufer laufenden Wellen ist der Einfluss $m^{-1/3}$ auf D_{50} , insbesondere bei kleinen, flachen Böschungswinkeln, überschätzt. Gl. (6-3) sollte deshalb nur für technisch hergestellte Böschungen mit Neigungen m von ca. 2 - 5 angewendet werden.

Zur Berücksichtigung des Einflusses des inneren Reibungswinkels φ'_D und des Böschungswinkels β kann in erster Näherung in Analogie zur Bemessung bei der Wiederauffüllungsströmung angesetzt werden:

$$D_{50} \geq \frac{H_{u,Heck} C_{B\ddot{o}}}{B_B^* \frac{\rho_S - \rho_W}{\rho_W}} \quad (6-4)$$

mit

B_B^* Beiwert für Auftrittshäufigkeit [-]
 $B_B^* \approx 2,0$ bei häufigem Auftreten des Bemessungsfalls oder wenn Deckwerksschäden möglichst vollständig vermieden werden sollen
 $B_B^* \approx 3,0$ bei geringer Häufigkeit des Bemessungsfalls oder wenn begrenzte Unterhaltungsaufwendungen in Kauf genommen werden

$C_{B\ddot{o}}$ Faktor für Böschungseinfluss [-]
 Definition unter Gl. (6-12) in 6.7.1,

$H_{u,Heck}$ Heckwellenhöhe [m] nach 5.5.4.4, Gl. (5-32) sowie Bild 5.13 bzw. Sekundärwellenhöhe nach 5.5.5.2, Gl. (5-47), begrenzt durch Gl. (5-50)

Beobachtungen zeigen, dass steile Wellen bei gleicher Wellenhöhe ein größeres Zerstörungspotenzial haben als Wellen mit geringer Steilheit. In Anlehnung an die Bemessung gegen auflaufende Wellen gilt:

$$D_{50} \geq \frac{H_{u,Heck}^{3/4} L_H^{1/4} C_{B\ddot{o}}}{\tilde{B}_B \frac{\rho_S - \rho_W}{\rho_W}} \quad (6-5)$$

mit

\tilde{B}_B Beiwert für Auftrittshäufigkeit [-]
 $\tilde{B}_B \approx 6$ bei häufigem Auftreten des Bemessungsfalls oder wenn Deckwerksschäden möglichst vollständig vermieden werden sollen
 $\tilde{B}_B \approx 9$ bei geringer Häufigkeit des Bemessungsfalls oder wenn begrenzte Unterhaltungsaufwendungen in Kauf genommen werden

L_H in Analogie zu Tiefwasserwellen ermittelte Wellenlänge der brechenden Heckquerwelle [m] s. Gl. (6-6)

Die Wellenlänge L_H ist dabei von der Heckform des Schiffes, vor allem aber vom Uferabstand abhängig. Für GMS, Schlepper und Schubverbände gilt näherungsweise bei ufernaher Fahrt:

$$L_H \approx 2,5 u_{eff} \quad (6-6)$$

mit

u_{eff} effektiver Uferabstand [m]
 entsprechend Bild 5.19 in 5.5.4.7

Extrem ufernah fahrende kleine Schiffe können demnach, trotz ggf. geringerer Wellenhöhe, bemessungsrelevant werden.

6.3 Steingröße bei Propulsionsströmung

6.3.1 Steingröße bei Strahlangriff

Im Belastungsfall "Manövrierfahrt" bzw. Standprobe ist der zur Gewährleistung der Sohlenstabilität ohne signifikante Kolkbildung erforderliche mittlere Steindurchmesser D_{50} des Deckschichtmaterials der Sohlensicherung für die maximale Geschwindigkeit v_{Bmax} (s. 5.6.4) nach der folgenden Beziehung zu bestimmen:

Steingröße D_{50} aus Schraubenstrahl [m]

$$D_{50} \geq B_S \frac{v_{max,S}^2}{g} \frac{\rho_W}{\rho_S - \rho_W} \quad (6-7)$$

mit

B_S Beiwert bei Strahlangriff auf ebener Sohle [-]

$B_S \approx 1,23$ für Schiff ohne Zentralruder und Binnenschiff mit Tunnelheck, Standardsituationen 1, 4 (s. 5.6.3.1) und Bugstrahlruder (s. 5.6.5)

$B_S \approx 0,64$ für Schiff mit Zentralruder, Standardsituationen 2 und 3 (s. 5.6.3.1)

$v_{max,S}$ maximale Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle [m/s]

$v_{max,S} = v_{xr}$ bzw. v_{xr1} nach exakter Berechnung s. 5.6.3.3

$v_{max,S} = v_{Bmax}$ bzw. v_{Bmax1} nach vereinfachter Berechnung s. 5.6.4

Beachte: Anteil des umgebenden Strömungsfeldes ist zu berücksichtigen (vektorielles Addieren der maßgebenden Strömungsgeschwindigkeit in Sohlhöhe), s. folgender Hinweis

Hinweis: Die maßgebende Strömungsgeschwindigkeit in Sohlhöhe setzt sich bei einem fahrenden Schiff aus der Rückströmung, der Nachlaufströmung und der Grundströmung im Kanal/Fluss zusammen. Hierbei ist zu beachten,

- dass in Sohlhöhe eine geringere Strömungsgeschwindigkeit herrscht,
- dass die Rückströmung durch den Rumpf des Schiffes unter dem Schiff behindert sein kann und
- dass sogar die Nachlaufströmung (vom Schiff in Fahrtrichtung mitgenommenes Wasser) entgegen der Propulsionsströmung wirken kann.

Da dies extrem vom Einzelfall abhängig ist, wird hierfür kein Bemessungsverfahren angegeben.

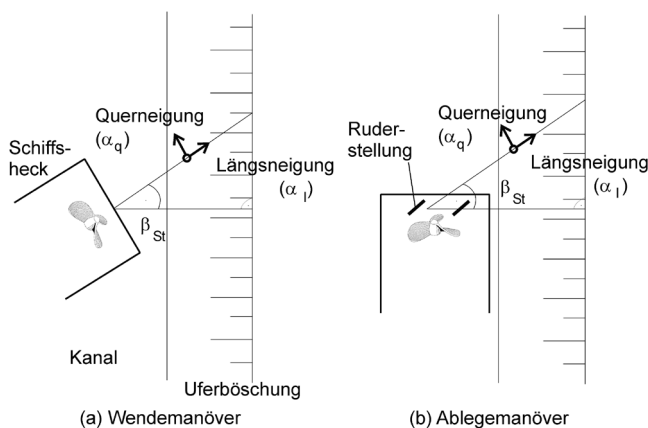


Bild 6.4 Prinzipskizze zum Strahlgriff auf ein geböschtes Ufer bei (a) einem Wendemanöver oder bei (b) Umlenkung des Strahls bei einem Ablegemanöver

Trifft der Strahl aus dem Hauptantrieb oder dem Bugstrahlruder auf eine Uferböschung, ist der o. g. B_S -Wert abhängig von der Längs- und Querneigung in Strahlrichtung (s. Bild 6.4) und durch $B_{S,B\delta}$ zu ersetzen:

$$\left. \begin{aligned} B_{S,B\delta} &= B_S / K \\ K &= K_l K_q \\ K_l &= \frac{\sin(\alpha_l + \varphi'_D)}{\sin \alpha_l} \\ K_q &= \cos \alpha_q \sqrt{1 - \frac{(\tan \alpha_q)^2}{(\tan \varphi'_D)^2}} \\ \tan \alpha_l &= \tan \beta \cos \beta_{St} \\ \tan \alpha_q &= \tan \beta \sin \beta_{St} \end{aligned} \right\} \quad (6-8)$$

mit

- K Neigungsbeiwert [-]
- K_l Längsneigungsbeiwert [-]
- K_q Querneigungsbeiwert [-]
- α_l Längsneigungswinkel [°]
- α_q Querneigungswinkel [°]
- β Böschungswinkel [°]
 $\beta = \arctan(1/m)$
- β_{St} Winkel zwischen Strahlachse und Böschungsnormale (Angriffswinkel) [°]
- φ'_D Winkel der inneren Reibung des Deckwerks [°] nach 4.3

6.3.2 Steingröße zur Begrenzung der Kolkentiefe infolge Schraubenstrahl

Zur Abschätzung der Kolkentiefe aus Schraubenstrahlbelastung bzw. zur erforderlichen Steingröße bei vorgegebener tolerierter Kolkentiefe kann auf die von /Römisch 1975/ und /Ducker, Miller 1996/ angegebenen Gleichungen zurückgegriffen werden:

$$\left. \begin{aligned} \frac{h_{\text{Kolk}}}{D_{85}} &= C_m \cdot 0,1 \left(\frac{B^*}{B_{85}^*} \right)^{13} \quad \text{für } 1 \leq \frac{B^*}{B_{85}^*} \leq 1,4 \\ \frac{h_{\text{Kolk}}}{D_{85}} &= C_m \cdot 4,6 \left(\frac{B^*}{B_{85}^*} \right)^{2,25} \quad \text{für } \frac{B^*}{B_{85}^*} > 1,4 \\ B^* &= \frac{v_{\text{max,S}}}{\sqrt{g' D_{85}}} \\ B_{85}^* &= B_{85,0}^* \sqrt{K} \end{aligned} \right\} (6-9)$$

mit

- B^* Belastungsbeiwert [-]
- B_{85}^* Stabilitätsbeiwert auf geneigter Böschung [-]
- $B_{85,0}^*$ Stabilitätsbeiwert allgemein [-]
 $B_{85,0}^* = 1,25$ Standardsituationen 1 und 4
 (s. 5.6.3.1) sowie Bugstrahlruder
 (s. 5.6.5)
- $B_{85,0}^* = 1,73$ Standardsituationen 2 und 3
 (s. 5.6.3.1)
- C_m Beiwert für die Belastungsdauer [-]
 $C_m = 1,0$ für Dauerbelastung
 $C_m = 0,3$ für Kurzzeitbeanspruchung bei
 Manövrierfahrt und bei Kolkbildung
 in Deckwerken mit üblichen
 Wasserbausteinen (gilt nicht für
 Sand oder Kies)
- g' relative Dichte [m/s^2]
 $g' = g((\rho_s - \rho_w)/\rho_w)$
- h_{Kolk} Kolkentiefe unter der Gewässersohle [m]
- K Neigungsbeiwert [-] (s. Gl. (6-8))
- $v_{\text{max,S}}$ maximale Strömungsgeschwindigkeit an der
 Sohle [m/s]
 - bei Hauptantrieb $v_{B\text{max}}$ oder $v_{B\text{max}1}$ nach 5.6.4
 - bei Bugstrahlruder $v_{x\text{max}}$ oder $v_{\text{max,S,K}}$ nach
 5.6.5
- ρ_w Dichte des Wassers [kg/m^3]
- ρ_s Dichte des Steinschüttmaterials [kg/m^3]

Für kleine Korngröße und große Kolkiefen ist die zeitliche Kolkentwicklung zu beachten /Gaudio et al. 2003/.

6.4 Steingröße bei Belastung durch Sekundärschrägwellen

Bei uferparalleler Fahrt und $v_s/\sqrt{g h_m} < 0,8$ treffen die Wellenkämme der vom Schiffsbug und -heck ausgehenden Schrägwellen in einem Winkel β_w von ca. 55° auf das Ufer (s. Bild 5.20). Die schiffserzeugten Sekundärwellen können nach /Verhey, Bogaerts 1989/ wie auflaufende Wellen behandelt werden, wenn die Wellenhöhe wie folgt mit dem Faktor $\cos \beta_w$ abgemindert wird:

nominale Steingröße D_{n50} aus Sekundärschrägwellen [m]

$$D_{n50} \geq \frac{H_{\text{Sek}} (\cos \beta_w)^{1/2} \xi^{1/2}}{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} 2,25 (\cos \beta + \sin \beta)} \quad (6-10)$$

$$\xi = \tan \beta \left(\frac{\lambda_s}{H_{\text{Sek}}} \right)^{1/2}$$

mit

- H_{Sek} Sekundärwellenhöhe [m] nach 5.5.5, ggf. überlagert mit Windwellen nach 5.7
- λ_s Wellenlänge der Sekundärschrägwelle [m] nach Gl. (5-46)
- β Böschungswinkel [$^\circ$]
- β_w Winkel zwischen Wellenkamm der Sekundärschrägwelle und Uferlinie [$^\circ$]
 i. d. R. $\beta_w = 55^\circ$ s. Bild 5.20
- ξ Brecherkennzahl [-]

Bei uferparallel laufenden Heckquerwellen können näherungsweise die Gln. (6-3) und (6-4) verwendet werden. $H_{u,\text{Heck}}$ ist dabei durch H_{Sek} nach Gl. (5-47), begrenzt durch Gl. (5-50) zu ersetzen.

6.5 Steingröße bei Windwellen

Der erforderliche mittlere nominale Steindurchmesser D_{n50} einer Deckschicht bei ausschließlicher Belastung durch Windwellen ist nach folgender Formel zu bestimmen /PIANC 1987a/:

nominale Steingröße D_{n50} aus Windwellen [m]

$$D_{n50} \geq \frac{H_s \sqrt{\xi}}{2,25} \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} \quad (6-11)$$

- mit
- D_{n50} erforderlicher mittlerer nominaler Steindurchmesser [m]
 - H_s signifikante Wellenhöhe (Bemessungswellenhöhe für Windwellen) [m]
 - ρ_W Dichte des Wassers [kg/m³]
 - ρ_S Dichte der Wasserbausteine [kg/m³]
 - ξ Brecherkennzahl [-] s. 5.8.2

6.6 Steingröße bei kombinierter Schiffs- und Windwellenbelastung

In seltenen Fällen können sich Sekundärschrägwellen und Windwellen ungünstig, i. d. R. hinter dem Schiff, überlagern. Bei annähernd gleichen Wellenlängen addieren sich die Wellenhöhen. Bei stark ungleichen Wellenlängen ist für die resultierende Wellenhöhe

$$\frac{1}{2} H_{Sek} + H_s \quad (H_s > H_{Sek})$$

bzw.

$$\frac{1}{2} H_s + H_{Sek} \quad (H_{Sek} > H_s)$$

anzusetzen. Je nachdem, welcher Wellenhöhenanteil am resultierenden Wert größer ist, wird zur Bestimmung der Steingröße die entsprechende Formel aus 6.4 bzw. 6.5 angewendet.

6.7 Steingröße bei Strömungsangriff

Die geplante Deckschicht muss neben den Belastungen aus Schiffs- und Windwellen auch dem Strömungsangriff parallel zu Böschung und Gewässerbett standhalten. Dieser resultiert aus der natürlichen Strömung, der Rückströmung, ggf. aus der Überlagerung der beiden vorgenannten Größen oder aus der Wiederauffüllungsströmung der brechenden Heckwelle.

6.7.1 Steingröße bei weitgehend böschungsparallelem Strömungsangriff

Zur groben Abschätzung der Steingröße kann folgende Formel dienen /PIANC 1987a/:

Steingröße D_{50} aus Strömung [m]

$$D_{50} \geq C_{Isb} C_{B\delta} \frac{v_{max}^2}{g} \frac{1}{\frac{\rho_S - \rho_W}{\rho_W}} \quad (6-12)$$

- mit
- $C_{B\delta}$ Faktor zur Berücksichtigung des Böschungseinflusses [-]
 $C_{B\delta} = 1/k$
 $k = \cos\beta [1 - (\tan^2\beta/\tan^2\phi'_D)]^{0,5}$
 - C_{Isb} Faktor nach Isbash [-]
 $C_{Isb} \approx 0,7$
 - D_{50} erforderliche Steingröße (Siebkorndurchmesser) bei 50 % Siebdurchgang [m]
 - g Erdbeschleunigung [m/s²]
 - v_{max} maximale Strömungsgeschwindigkeit [m/s] aus Rückströmung und Fließgeschwindigkeit
 Fließgeschwindigkeit in Fahrtrichtung (Talfahrt):
 $v_{max} = \hat{v}_{rück} - v_{Str}$
 Fließgeschwindigkeit entgegen Fahrtrichtung (Bergfahrt):
 $v_{max} = \hat{v}_{rück} + v_{Str}$
 - $\hat{v}_{rück}$ maximale Rückströmungsgeschwindigkeit [m/s] $\hat{v}_{rück,u,Bug}$ für den Bugbereich nach 5.5.4.2 $\hat{v}_{rück,u,Heck}$ für den Heckbereich nach 5.5.4.3
 - v_{Str} Strömungsgeschwindigkeit ohne Schifffahrt [m/s] in Böschungsnähe
 - β Böschungswinkel [°]
 - ϕ'_D innerer Reibungswinkel [°] bei üblichem Deckschichtmaterial ca. 55°
 - ρ_W Dichte des Wassers [kg/m³]
 - ρ_S Dichte des Schüttsteinmaterials [kg/m³]

Gl. (6-12) basiert auf einer Grenzdefinition von Isbash /DVWK 118/, die für horizontale und schwach geneigte Sohlen die Stabilität bei reinem Strömungsangriff gewährleistet. Im Vergleich zu anderen Ansätzen /DVWK 118; Söhngen, Koll 1997/ liefert Gl. (6-12) die größten Werte.

Die Erweiterung der Grundgleichung um den Faktor $C_{B\delta}$ beschreibt die Vergrößerung des erforderlichen nominalen Steindurchmessers D_{n50} infolge des Böschungswinkels β und des inneren Reibungswinkels ϕ'_D der Steinschüttung. Die Abhängigkeit $C_{B\delta} = \text{Fkt.}(\beta, \phi'_D)$ ist in Bild 6.5 zu sehen.

Der Bewegungsbeginn des natürlichen Sohlenmaterials (anschließend an den Deckwerksfuß) lässt sich abschätzen mit Ansätzen von **Hjulström** (empirischer Ansatz; Zusammenhang mittlere Fließgeschwindigkeit und mittlerer Korndurchmesser), **Shields** (halb-empirischer Ansatz; Zusammenhang Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit und Sohlrauheit; iterative Lösung) oder **Bonnefille** (wie Shields; direkte Lösung), die in /Dittrich 1998/

ausführlich dargestellt werden. Alle diese Methoden gelten für gleichförmiges Sohlenmaterial ($U = D_{60}/D_{10} < 3$) mit Korngrößen $D < 100$ mm.

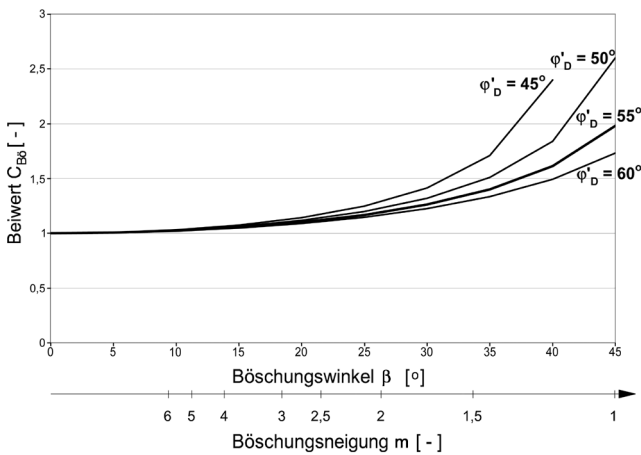


Bild 6.5 Abhängigkeit des Faktors C_{B0} von dem Böschungswinkel β bzw. der Böschungseigung m und dem inneren Reibungswinkel ϕ_D

6.7.2 Steingröße bei Böschungsbelastung durch Wiederauffüllungsströmung

Für die hochturbulente, z. T. mit Luft durchmischte, böschungsparelle und kurzzeitig Strömungsbelastung, die bei einer gebrochenen Heckquerwelle auftritt (Brecherkriterium s. 5.5.4.5), wenn die Absenkmulde vom Heck her aufgefüllt wird, ist der Beiwert C_{Isb} in Gl. (6-12) abzumindern. Danach ergibt sich mit dem Größtwert der Strömungsgeschwindigkeit u_{max} unter Berücksichtigung der Grundströmung für den Korndurchmesser D_{50} :

Steingröße D_{50} aus Wiederauffüllungsströmung [m]

$$D_{50} \geq 0,5 C_{B0} \frac{u_{max,B}^2}{g} \frac{1}{\frac{\rho_S - \rho_W}{\rho_W}} \quad (6-13)$$

mit

$u_{max,B}$ Bemessungsgeschwindigkeit in der Wiederauffüllungsströmung [m/s]
maximale Geschwindigkeit der Wiederauffüllungsströmung u_{max} nach Gl. (5-33) in 5.5.4.5 plus Anteil der Grundströmung (mittlere Strömungsgeschwindigkeit in Böschungsnähe) v_{Str}

Fließgeschwindigkeit in Richtung v_S (Talfahrt):

$$u_{max,B} = u_{max} + v_{Str}$$

Fließgeschwindigkeit entgegen Richtung v_S (Bergfahrt):

$$u_{max,B} = u_{max} - v_{Str}$$

Wegen der geringen Wassertiefe in der Wiederauffüllungsströmung, die in etwa der Wellenhöhe entspricht, sind Grenzschichteffekte zu beachten. Eine raue Böschung führt daher zu größeren Böschungsbeanspruchungen als eine Böschung, die mit kleinen Korngrößen gesichert ist. Dieser Effekt kann nach /BAW 2004/ näherungsweise unter Einbeziehung der Heckwellenhöhe wie folgt berücksichtigt werden:

Steingröße D_{50} [m] unter Berücksichtigung der Heckwellenhöhe

$$D_{50} \geq \left(\frac{u_{max,B}^2 C_{B0}}{\frac{\rho_S - \rho_W}{\rho_W} g 1,4 H_{u,Heck}^{1/3}} \right)^{3/2} \quad (6-14)$$

mit

$H_{u,Heck}$ Maximalwert der Heckwellenhöhe inklusive Sekundärwellenanteil im Bereich der Böschung [m] nach 5.5.4.4, Gl. (5-32)

Die oben angegebenen Formeln können wegen der Unsicherheiten in der Bestimmung von $u_{max,B}$ nur einen ersten Anhalt zur erforderlichen Deckwerkssteingröße liefern. Sie zeigen aber, dass die Schiffsgeschwindigkeit und die Höhe der brechenden Heckwelle, von der $u_{max,B}$ im Wesentlichen abhängt, entscheidend für die Steingröße sind.

6.8 Steingröße nach Technischen Lieferbedingungen für Wasserbausteine

Die Steingröße D_{n50} ist nicht identisch mit der mittleren Größe von Wasserbausteinen, wenn sie nach den Technischen Lieferbedingungen für Wasserbausteine /TLW/ klassifiziert sind. In /TLW/ (Stand 1997) wird die charakteristische größte Steinlänge D_L (größte gemessene Länge eines Wasserbausteins analog Länge a in Bild 6.3) als Basis für die Klassifizierung verwendet, wobei die dort angegebenen Klassengrenzen D_{L0} und D_{L100} entsprechen. Es handelt sich folglich nicht um Steingrößen, die durch Siebung ermittelt werden. D_{L50} ist in /TLW/ nicht genau definiert. Zulässige Kornverteilungsbänder der Schüttsteinklassen 0 – V nach den /TLW/ sind auf Bild 6.6 zu sehen. Bei Annahme einer log-linearen Kornverteilung, gültig für die mittlere Linie in

den Kornverteilungsbändern gemäß Bild 6.6 (entspr. Klassengrenzen in */TLW/*), kann allgemein D_{Lx} oder bei 50 % D_{L50} (s. Bild 6.2) wie folgt berechnet werden:

$$\text{allgemein: } D_{Lx} = D_{L0} \left(\frac{D_{L100}}{D_{L0}} \right)^{\frac{x}{100}}$$

$$\text{für } x = 50 \%: D_{L50} = D_{L0} \left(\frac{D_{L100}}{D_{L0}} \right)^{0,50}$$

Es ist zu prüfen, ob die tatsächliche Kornverteilungskurve durch die mittlere Linie der Kornverteilungsbänder gemäß Bild 6.6 genau genug erfasst wird. Falls nicht, so ist von der unteren Hüllkurve auszugehen.

Nach */Abromeit 1997; Knieß 1977/* steht die Steingröße für kompakte, d. h. weder plattige noch stabförmige Wasserbausteine nach */TLW/* in folgender Abhängigkeit zur nominalen Steingröße D_n :

Steingröße nach */TLW/* D_{TLW} [m]

$$D_{TLW} = D_L \approx 1,6 D_n \tag{6-15}$$

mit

D_L charakteristische größte Steinlänge [m]

D_n nominale Steingröße [m]

D_{TLW} Steindurchmesser nach */TLW/* [m]

Der Zusammenhang der Gl. (6-15) ist begründet in der Form der Wasserbausteine, die zwischen den Formen Kugel und Würfel liegt */Knieß 1977/*.

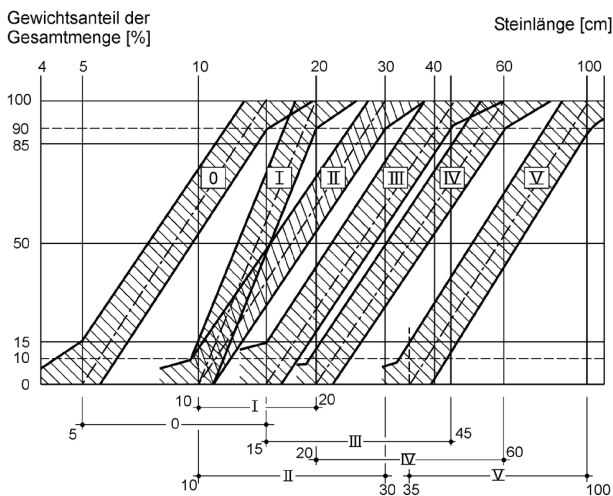


Bild 6.6 Zulässige Kornverteilungsbänder für die Schüttsteinklassen 0 – V nach den Vorgaben in den */TLW/* aus */MAKI (Stand 1989)*

Der in Gl. (6-15) genannte Faktor von 1,6 ist ein grober Richtwert. Für Wasserbausteine aus metamorphen Schichtgesteinen wie z. B. Kalk, Grauwacke, Gneis o. a. ist er häufig größer, für plutonische Gesteine wie Basalt i. d. R. kleiner. Im Einzelfall ist für die vorgesehenen Wasserbausteine das Verhältnis zwischen Steinlänge und nominalem Durchmesser anhand einer Probe zu bestimmen.

In der 2004 eingeführten */TLW/*, Stand 2003, werden Siebklassen (Kriterium Durchmesser D_i) und Gewichtsklassen (Kriterium G_i) angegeben. Bei Ermittlung von D_{50} kann dieser Wert direkt für die Ermittlung der erforderlichen Siebklasse verwendet werden. Bei Berechnung eines nominalen Steindurchmessers D_{n50} kann dieser Wert für die Auswahl einer Siebklasse in Anlehnung an Gl. (6-2) wie folgt in D_{50} umgerechnet werden:

$$D_{50} = 1,15 D_{n50}$$

Für die Auswahl einer Gewichtsklasse G_{50} kann in Anlehnung an Gl. (6-1) der nominale Steindurchmesser D_{n50} wie folgt umgerechnet werden:

$$G_{50} = (D_{n50})^3 \rho_S \quad \text{bzw.}$$

$$G_{50} = 0,65 (D_{50})^3 \rho_S$$

Die */TLW/*, Stand 2003, basiert auf der */DIN EN 13383/*. Weitere Erläuterungen hierzu sind in */Abromeit 2004/* zu finden.

6.9 Dicke der Deckschicht

Die Anwendungen der in 6.2 - 6.7 genannten Bemessungsformeln für die erforderliche Steingröße setzt eine Mindesteinbaudicke d_D der Wasserbausteine voraus. Dies ergibt sich aus den Randbedingungen der verschiedenen Modellversuche, die den Bemessungsansätzen zu Grunde liegen */Dietz 1973; Hudson 1959; Fuehrer, Römisch 1985/*:

Deckschichtdicke d_D [m]

$$d_D = (1,5 \div 2,0) D_{n50} \tag{6-16}$$

mit

d_D erforderliche Einbaudicke einer Deckschicht [m]

D_{n50} erforderlicher mittlerer nominaler Steindurchmesser [m]

Ein sehr durchlässiger Deckschichtunterbau (Grobkies oder gröberes Kornmaterial) ist bei Wellen- und/oder Strömungseinwirkungen hydraulisch ebenfalls wirksam. Seine Dicke darf daher bei der hydraulischen Bemessung einer ungebundenen Deckschicht aus geschütteten Steinen in vollem Umfang berücksichtigt werden */Abromeit 1997/*.

Wird der Ungleichförmigkeitsgrad U der Steinschüttung berücksichtigt, so kann als geringste erosionsfeste Einbaudicke geschütteter Steine folgende Dicke empfohlen werden /Abromeit 1997/:

mindestens erforderliche Einbaudicke $\min d_D$ [m]

$$\min d_D = 1,5 D_{n50} \sqrt{U} \quad (6-17)$$

mit

D_{n50} erforderliche mittlere nominale Steingröße [m]

$\min d_D$ mindestens erforderliche Einbaudicke [m]

U Ungleichförmigkeitszahl der Steinschüttung [-]
 $U = D_{60} / D_{10}$

6.10 Ermittlung hydraulisch gleichwertiger Deckwerke

Die vorgenannten Bemessungsansätze liefern nur die zur Mindesteinbaudicke gehörende mittlere Steingröße. Bei größerer Einbaudicke oder sehr durchlässigem Deckschichtunterbau dürfen Steine kleiner sein. Die Einbaudicke der für einen Bemessungsfall zulässigen, alternativen hydraulisch gleichwertigen Deckschichten lässt sich nach /Abromeit 1997/ für die Belastung durch auflaufende Wellen näherungsweise wie folgt ermitteln:

Einbaudicke einer hydraulisch gleichwertigen Deckschicht $d_{D(B)}$ [m]

$$d_{D(B)} = \frac{D_{nSt(A)} d_{D(A)} \rho'_A}{D_{nSt(B)} \rho'_B} \quad (6-18)$$

mit

$d_{D(A)}$ Einbaudicke der Ausgangsdeckschicht (A) einschließlich eines evtl. sehr durchlässigen Mineralkornunterbaus [m]

$d_{D(B)}$ Einbaudicke der alternativen hydraulisch gleichwertigen Deckschicht (B) einschließlich der Dicke eines evtl. sehr durchlässigen Mineralkornunterbaus [m]

$D_{nSt(A)}$ nominale Steingröße der Ausgangsdeckschicht des Bemessungsfalles (A) [m]

$D_{nSt(B)}$ gewählte nominale Steingröße der alternativen hydraulisch gleichwertigen Deckschicht (B) [m]

ρ_W Dichte des Wassers [kg/m³]
 ca. 1000 kg/m³

ρ_A Trockenrohddichte des Einzelsteines des Bemessungsfalles (A) [kg/m³]

ρ'_A Auftriebsdichte des Einzelsteines des Bemessungsfalles (A) [kg/m³]

$$\rho'_A = \rho_A - \rho_W$$

ρ_B Trockenrohddichte des Einzelsteines der alternativen hydraulisch gleichwertigen Deckschicht (B) [kg/m³]

ρ'_B Auftriebsdichte des Einzelsteines der alternativen hydraulisch gleichwertigen Deckschicht [kg/m³]

$$\rho'_B = \rho_B - \rho_W$$

Die Anwendung dieser Umrechnung empfiehlt sich, wenn z. B. die ermittelte Steingröße der Ausgangsdeckschicht des Bemessungsfalles nicht der mittleren Steingröße der Größenklasse nach /TLW/ entspricht und eine größere oder kleinere Steingröße gewählt werden soll. Ähnliches gilt, wenn aus Standsicherheitsgründen eine geringfügig größere Deckschichtdicke erforderlich wird, als sie sich aus der hydraulischen Bemessung ergibt. In diesem Fall darf die Steingröße geringfügig verringert werden. Die Verwendung einer kleineren Steingrößenklasse kann z. B. bei einem Kornfilter zur Erweiterung des Spektrums geeigneter Filterkörnungen oder evtl. sogar zur Einsparung einer Filterstufe /MAK/ und bei einem geotextilen Filter zum Entfallen einer mineralischen Zwischenlage /MAG/ führen.

Die Anwendbarkeit der Gl. (6-18) ist aus Gründen der Stabilität des Einzelkorns gegen Wellen- und Strömungsangriff hinsichtlich der Korngröße $D_{nSt(B)}$ begrenzt, weil die hydraulische Stabilität durch Vergrößerung der Deckwerksdicke nicht beliebig gesteigert werden kann.

Umgekehrt kann die Deckwerksdicke nicht beliebig verkleinert werden, um den Verbund der Steine untereinander nicht zu gefährden. Deshalb dürfen die erforderlichen Steingrößen nach Gln. (6-3) - (6-5), (6-10) und (6-12) - (6-14) unabhängig von Gl. (6-18), nicht unterschritten werden.

Außerdem sind die Mindestdicken gemäß 6.9 einzuhalten.

6.11 Mindestdicken

Neben den nach 6.9 zu ermittelnden Mindestdicken auf Grund der hydraulischen Beanspruchungen sind nachfolgend genannte Mindestdicken einzuhalten /Abromeit 1997/.

Die Mindestdicke einer Deckschicht (auf der **Sohle**) für eine ausreichende Sicherheit gegenüber Ankerwurf beträgt:

$$\left. \begin{array}{l} \min d_D \geq 0,5 m + x \quad (\text{auf Kornfilter}) \\ \min d_D \geq 0,6 m + x \quad (\text{auf Geotextilfilter}) \end{array} \right\} (6-19)$$

mit

$\min d_D$ Mindestdicke der Deckschicht [m]

x Zuschlag für verschiedene Steinmaterialien [m]

$x = 0$ m bei Verwendung von Wasserbausteinen

$x = 0,2$ m bei feinkörnigem oder unsortiertem Material

Die Mindestdicke (an der **Böschung**) für einen ausreichenden Schutz gegen Schiffsanfahrung beträgt:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min d_D \geq 0,3 \text{ m} + x \quad (\text{auf Kornfilter}) \\ \min d_D \geq 0,5 \text{ m} + x \quad (\text{auf Geotextilfilter}) \end{array} \right\} \quad (6-20)$$

Bei Verwendung von Kornfiltern ist generell folgende Mindestdeckschichtdicke einzuhalten:

$$\min d_D \geq 1,5 D_{50,TLW} + 0,10 \text{ m} \quad (6-21)$$

mit

$D_{50,TLW}$ erforderlicher mittlerer Durchmesser entsprechend /TLW/ [m]

Bei der Verwendung von geotextilen Filtern ist zur Gewährleistung eines ausreichenden UV-Schutzes folgende Mindestdeckschichtdicke einzuhalten:

$$\min d_D \geq \text{Maximum von } \left\{ \begin{array}{l} 1,5 D_{50,TLW} \\ 0,10 \text{ m} \end{array} \right\} \quad (6-22)$$

6.12 Deckwerkslänge in Böschungfalllinie bei Wellenbelastung

6.12.1 Allgemeines

Wenn sich ein Deckwerk unter der Wirkung der Wellen über Reibung nach 7.2.5.2 auf der Böschung selbst tragen kann und der anstehende Boden unterhalb des unteren Endes der Böschungssicherung nach /MAK/ erosionssicher ist, braucht die Böschungssicherung mit Steingröße und Dicke nach o. g. Bemessungsgrundlagen nicht bis zur Gewässersohle geführt zu werden. Für die Bemessung der Deckwerke unterhalb der Hauptsicherung liegen keine gesicherten Erkenntnisse vor. Es wird empfohlen, die Böschung so zu sichern, dass sie der mittleren Rückströmungsgeschwindigkeit (Gl. (5-23) in 5.5.3) standhält.

Die Länge eines Deckwerks in Richtung der Böschungfalllinie ist auf den Ruhewasserspiegel RWS zu beziehen. Sie ist abhängig von der Wellenart.

6.12.2 Oberhalb des Ruhewasserspiegels

Die Obergrenze eines Deckwerks hängt von Wellenaufschlag (s. 5.8.6) und Windstau (s. 5.7.4) unter Berücksichtigung des erforderlichen Freibords ab.

6.12.3 Unterhalb des Ruhewasserspiegels

Die Untergrenze eines Deckwerks hängt mit dem erforderlichen mittleren Steindurchmesser D_{n50} zusammen /PIANC 1987a/.

Für **Primärwellen** lässt sich die Tiefe R'_d unter dem RWS aus Bild 6.7 anhand der maximalen Wasserspiegelabsenkung $\Delta \hat{h}_{u,Bug}$ (s. 5.5.4.2) bzw. $\Delta \hat{h}_{u,Heck}$ (s. 5.5.4.3) bestimmen. Die Länge des Deckwerks unter dem RWS ist über die Böschungsneigung bzw. den Böschungswinkel zu ermitteln.

Für **Sekundär- und Windwellen** hängt die Tiefe R'_d von der entsprechenden Wellenhöhe H ab und ist Bild 6.8 zu entnehmen. Bei Windwellen z. B. gilt $H = H_S$ als signifikante Wellenhöhe (s. 5.7.5).

Der ungünstigere von beiden R'_d -Werten ist maßgebend.

Bei geringem Sicherheitsabstand Schiff - Ufer und der Gefahr einer Uferkollision ist die Tiefe des Deckwerks mindestens unter die Kimm des Schiffes in Fahrt zu ziehen.

6.13 Konstruktive Festlegung beim Übergang eines senkrechten Ufers auf ein Böschungsdeckwerk

Beim Übergang eines senkrechten Ufers auf ein Böschungsdeckwerk ist die Deckschicht auf 25 m Länge für die doppelte Wellenhöhe zu bemessen, weil dort die Mach-Reflexion auftreten kann (s. 5.8.7).

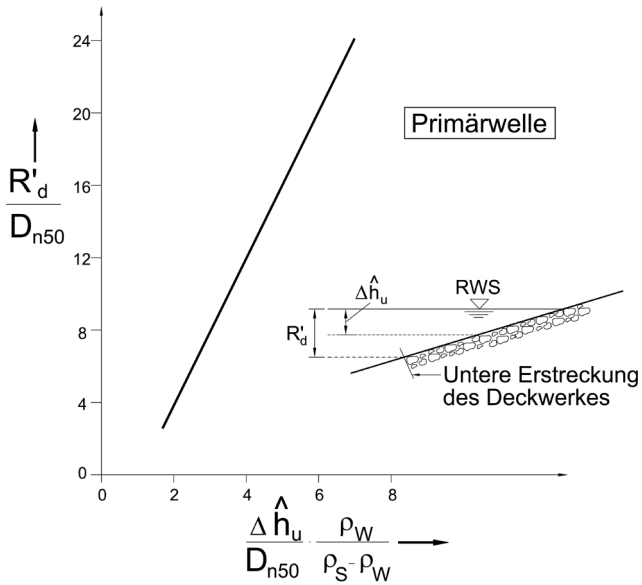


Bild 6.7 Deckwerkslänge unterhalb RWS bei **Primärwellen** nach IPIANC 1987a/ ($\Delta h = z_A$ in Kap. 5)

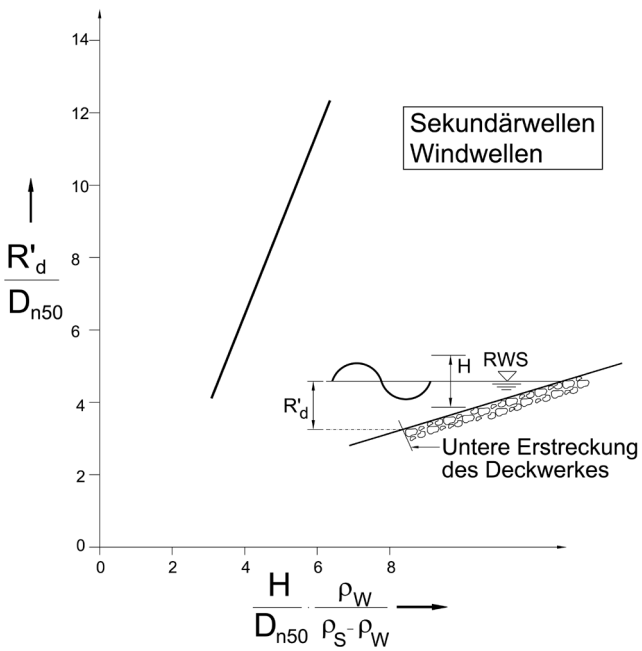


Bild 6.8 Deckwerkslänge unterhalb RWS bei **Sekundär- und Windwellen** nach IPIANC 1987a/

7 Geotechnische Bemessung von ungebundenen Deckschichten

7.1 Allgemeines

Bei der geotechnischen Bemessung einer Deckschicht ist zwischen der lokalen und der globalen Standsicherheit durchlässiger und dichter Deckwerke zu unterscheiden.

Lokale Standsicherheit ist für den Lastfall Porenwasserüberdruck infolge schnellen Wasserspiegelabsunkereignisses zu bemessen. Das hierzu erforderliche Flächengewicht des Deckwerks ist zu ermitteln. Zudem ist die globale Standsicherheit der wasserseitigen Böschung nachzuweisen.

Bei der geotechnischen Bemessung der Deckschicht darf in allen nachfolgenden Nachweisen das Gewicht des Kornfilters dem Flächengewicht der Deckschicht hinzugerechnet werden.

Für die Wichten des Filtermaterials γ_F und γ'_F kann bei Mineralkornfiltern von einem Porenanteil von $n = 0,45$ ausgegangen werden. Weitere Bemessungshinweise sind in 4.3 enthalten.

7.2 Lokale Standsicherheit durchlässiger Deckwerke

7.2.1 Allgemeines

Der schnelle Wasserspiegelabsunk eines Gewässers ist immer mit Porenwasserüberdrücken im oberflächennahen Bodenbereich des Gewässerbetts verbunden (s. 3.4.3).

Je nach Absunkgröße und Absunkgeschwindigkeit kann es dadurch bei einem durchlässigen Deckwerk

- zum Abgleiten in einer böschungparallelen Bruchfuge des Bodens in der kritischen Tiefe d_{krit} unterhalb des Deckwerks oder
- zu hydrodynamischen Bodenverlagerungen unmittelbar unter dem Deckwerk

kommen, wenn das Flächengewicht des Deckwerks nicht ausreichend groß ist.

Für die Ermittlung des erforderlichen Flächengewichts eines durchlässigen Deckwerks auf einer Uferböschung, d. h. für den Nachweis der lokalen Standsicherheit, müssen grundsätzlich die geotechnischen Nachweise gegen beide genannten Versagensmechanismen geführt werden. Diese Nachweise können in gleicher Weise auch zur Überprüfung der lokalen Standsicherheit natürlicher Uferböschungen herangezogen werden.

7.2.2 Tiefenlage der kritischen Bruchfuge d_{krit}

Der Scherwiderstand des Bodens erreicht infolge des Porenwasserüberdrucks in der kritischen Tiefe

d_{krit} seinen kleinsten Wert, sodass es an einer Böschung zum Abgleiten einer darüber liegenden Bodenschicht kommen kann. Die Tiefe der kritischen Bruchfuge wird zur Ermittlung des erforderlichen Flächengewichts der Deckschicht benötigt. Sie wird wie folgt ermittelt:

Tiefe der kritischen Bruchfuge d_{krit} [m]

$$d_{krit} = \frac{1}{b} \ln \frac{\tan \varphi' \gamma_w z_a b}{\cos \beta \gamma' (\tan \varphi' - \tan \beta)} \geq 0 \quad (7-1)$$

gültig für $\varphi' > \beta$

mit

b Porenwasserdruckparameter [1/m] nach Bild 5.51

z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsunk [m]

$z_a = H_{u,Bug}$ maßgebender Bugabsunk (inklusive Wasserspiegelanspannung vor dem Bug und ggf. langwelligen Anteilen des Bugstaus) nach Gl. (5-31) (s. auch Bild 5.18)

$z_a = H_{u,H}^*$ maßgebender Heckabsunk nach Gl. (5-41) (s. auch Bild 5.18)

β Böschungswinkel [°]

γ' Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m³]

γ_w Wichte des Wassers [kN/m³]

φ' effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]

Ergibt sich $d_{krit} \leq 0$, so ist die lokale Standsicherheit auch ohne das Deckwerksgewicht gewährleistet.

Gl. (7-1) ist nur für $\varphi' > \beta$ definiert. Wenn $\beta \geq \varphi'$ wird, ist ein Nachweis mit diesem Rechenansatz nicht mehr möglich. Die Deckschicht ist dann wie eine Stützmauer ohne Biegefestigkeit zu bemessen.

7.2.3 Flächengewicht der Deckschicht gegen Abgleiten des Deckwerks auf einer Böschung

7.2.3.1 Allgemeines

Das nachfolgende Berechnungsverfahren zur Ermittlung des erforderlichen Flächengewichts einer durchlässigen Deckschicht auf einer Uferböschung beruht auf den Bruchmechanismen, die für das Kräftegleichgewicht im plastischen Grenzzustand nach dem Rankine'schen Sonderfall angesetzt werden.

Es wird zunächst die unendlich lange Böschung betrachtet, und danach werden die zusätzlichen

Einflüsse aus einer Fußstützung oder einer Aufhängung einbezogen.

Es werden die Schubspannungen in der Gleitfläche ermittelt. Darüber hinaus einwirkende Kräfte (z. B. Fußstützung) werden in äquivalente Schubspannungen umgerechnet.

Die Berechnung des Flächengewichts der Deckschicht bzw. der zugehörigen Dicke einer durchlässigen Böschungssicherung erfolgt für die oberflächennahe, böschungsparelle Bruchfuge in der kritischen Tiefe d_{krit} , deren Ermittlung aus 7.2.2 hervorgeht.

7.2.3.2 Rechenverfahren

Das gegen Abgleiten einer Böschung erforderliche Deckschichtgewicht wird nach folgender Gleichung berechnet /Köhler 1989/:

erforderliches Flächengewicht der durchlässigen Deckschicht g' gegen Abgleiten [kN/m²]

$$g' = \gamma'_D d_D = \frac{\Delta u \tan \varphi' - c' - \tau_F - \tau_A}{\cos \beta \tan \varphi' - \sin \beta} - (\gamma'_F d_F + \gamma' d_{krit}) \quad (7-2)$$

gültig für $\varphi' > \beta$

mit

- c' effektive Kohäsion des Bodens [kN/m²]
- d_D Dicke der Deckschicht [m]
- d_F Dicke des Filters [m]
- d_{krit} kritische Tiefe der Bruchfuge [m] nach Gl. (7-1)
- g' Flächengewicht der Deckschicht [kN/m²]
- Δu Porenwasserüberdruck [kN/m²] nach Gl. (5-107) für $z = d_{krit}$ nach Gl. (7-1)
- β Böschungswinkel [°]
- γ' Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m³]
- γ'_D Wichte der Deckschicht unter Auftrieb [kN/m³]
- γ'_F Wichte des Filters unter Auftrieb [kN/m³] für geotextile Filter $\gamma'_F = 0$
- φ' effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]
- τ_A Zusatzspannung [kN/m²] aus einer Aufhängung der Deckschicht (s. 7.2.6)
- τ_F Zusatzspannung [kN/m²] aus einer Fußstützung (s. 7.2.5).

Gl. (7-2) ist nur für Böden mit einem Reibungswinkel $\varphi' > \beta$ definiert.

Die Dichte der Deckschicht unter Auftrieb wird wie folgt berechnet:

Dichte der durchlässigen Deckschicht unter Auftrieb γ'_D [kN/m³]

$$\gamma'_D = (1-n)(\gamma_S - \gamma_W) \quad (7-3)$$

mit

- n Porenanteil des Deckwerks [-]
- γ'_D Wichte der Deckschicht unter Auftrieb [kN/m³]
- γ_S Wichte des Schüttmaterials [kN/m³]
- γ_W Wichte des Wassers [kN/m³]

Für n gelten folgende Werte:

- ca. 50 – 55 % bei Verklappen unter Wasser
- ca. 45 % bei Schüttung im Trockenem
- ca. 30 – 40 % bei Nacharbeiten von Hand

Ist die wirksame Kohäsion c'

$$c' \geq \Delta u \tan \beta$$

und ist sie auf Dauer vorhanden, so ist die Sicherheit des Deckwerks gegen Abgleiten auf einem bindigen Boden ausreichend groß. Dies gilt sinngemäß auch für durchlässige Deckschichten auf einer Tondichtung, die in diesem Fall wie ein anstehender bindiger Boden betrachtet wird.

Bei Berücksichtigung einer Fußstützung bzw. Ankerkraft werden die daraus resultierenden äquivalenten Zusatzspannungen τ_F (s. 7.2.5) bzw. τ_A (s. 7.2.6) in Gl. (7-2) eingesetzt. Dabei ist zu beachten, dass diese zur Mobilisierung unterschiedliche Verformungen benötigen und nur entsprechend ihrem Mobilisierungsgrad angesetzt werden dürfen.

Die erforderliche äquivalente Schubspannung $\text{erf } \tau$ ergibt sich für eine gewählte Deckschichtdicke aus Gl. (7-2) wie folgt:

erforderliche äquivalente Schubspannung $\text{erf } \tau$ [kN/m²]

$$\text{erf } \tau = \frac{(d_D \gamma'_D + d_F \gamma'_F + d_{krit} \gamma')(\sin \beta - \cos \beta \tan \varphi')}{+ \Delta u \tan \varphi' - c'} \quad (7-4)$$

mit

- c' effektive Kohäsion des Bodens [kN/m²]
- d_D Dicke der Deckschicht [m]
- d_F Dicke des Filters [m]

- d_{krit} kritische Tiefe der Bruchfuge [m] nach Gl. (7-1)
- erf τ erforderliche Schubspannung [kN/m²]
 τ_F bei Fußstützung
 τ_A bei Deckwerksaufhängung
- Δu Porenwasserüberdruck [kN/m²]
 nach Gl. (5-107) für $z = d_{\text{krit}}$ nach Gl. (7-1)
- β Böschungswinkel [°]
- γ' Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m³]
- γ'_D Wichte der Deckschicht unter Auftrieb [kN/m³]
- γ'_F Wichte des Filters unter Auftrieb [kN/m³]
 für geotextile Filter $\gamma'_F = 0$
- φ' effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]

erforderliches Flächengewicht der durchlässigen Deckschicht g' unter Auftrieb gegen hydrodynamische Bodenverlagerung [kN/m²]

$$g' = \gamma'_D d_D \geq \frac{\Delta u}{\cos \beta} - (\gamma'_F d_F + \gamma' d_{\text{kritB}}) \quad (7-5)$$

mit

- b Porenwasserdruckparameter [1/m]
 nach Bild 5.51, abhängig von der Absinkgeschwindigkeit
- d_D Dicke der Deckschicht [m]
 (gemessen senkrecht zur Oberfläche)
- d_F Dicke des Filters [m]
 (gemessen normal zur Oberfläche)
- d_{kritB} kritische Tiefe der Bruchfuge [m]
 maßgeblich für hydrodynamische Bodenverlagerungen

$$d_{\text{kritB}} = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{\gamma_w z_a b}{\gamma' \cos \beta} \right) \geq 0 \quad (7-6)$$

7.2.3.3 Hinweise bei geschichtetem Baugrund

Bei geschichtetem Baugrund ist das Flächengewicht des Deckwerks für die Schicht zu bemessen, für die das größte Flächengewicht erforderlich ist.

7.2.4 Flächengewicht der Deckschicht gegen hydrodynamische Bodenverlagerungen

7.2.4.1 Allgemeines

Bei großer Fußstützkraft oder bei einer Deckwerksaufhängung, aber auch bei sehr flacher Neigung der Böschung, kann das gegen Abgleiten erforderliche Flächengewicht des Deckwerks so gering werden, dass infolge des Porenwasserüberdruckes eine Hebung der Bodenoberfläche und damit eine Auflockerung des Untergrundes eintreten kann.

Bei **kohäsionslosen Böden** ($c' = 0$) können dadurch hydrodynamische Bodenverlagerungen möglich werden /Köhler, Koenders 2003/. In einem solchen Fall ist das Flächengewicht so hoch anzusetzen, dass der Porenwasserüberdruck in der kritischen Tiefe durch eine entsprechend hohe Auflast überdrückt wird. Für kohäsionslose Böden gilt im Regelfall $b \leq 8$. Bei $b > 8$ sind die Böden im Allgemeinen kohäsiv.

Bei **kohäsiven Böden** ($c' > 0$) tritt hydrodynamische Bodenverlagerung nicht auf, und dieser Nachweis ist deswegen nicht erforderlich.

7.2.4.2 Rechenverfahren

Das erforderliche Flächengewicht g' der Deckschicht unter Auftrieb zur Verhinderung hydrodynamischer Bodenverlagerungen wird in Analogie zum hydraulischen Grundbruch wie folgt berechnet:

- g' Kraftwirkung des Flächengewichts der Deckschicht [kN/m²]
- z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsenk [m]
 s. unter Gl. (7-1)
- β Böschungswinkel [°]
- γ'_D Wichte der Deckschicht unter Auftrieb [kN/m³]
- γ' Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m³]
- γ'_F Wichte des Filters unter Auftrieb [kN/m³]
 für geotextile Filter $\gamma'_F = 0$
- γ_w Wichte des Wassers [kN/m³]
- Δu Porenwasserüberdruck [kN/m²]
 nach Gl. (5-107) für $z = d_{\text{krit}}$ nach Gl. (7-1)

7.2.5 Flächengewicht der Deckschicht bei Berücksichtigung einer Fußstützung

7.2.5.1 Allgemeines

Bei entsprechender Ausbildung des Deckwerks am Böschungsfuß nach /MAR/ (z. B. Fußvorlage, Fußeinbindung oder Fußspundwand) kann bei der Ermittlung des Flächengewichts der Deckschicht eine Fußstützkraft berücksichtigt werden, deren Größe aus der Scherfestigkeit des Deckwerks (Bruchmechanismus 1) oder aus der Standsicherheit des Deckwerksfußes (Bruchmechanismus 2) resultiert.

Bei dem Rechenansatz zur Ermittlung der mobilisierbaren Fußstützkraft wurden auf der sicheren Seite liegende Vereinfachungen der Bruchgeometrie und der Scherwiderstände zu Grunde gelegt. Die Fußstützkraft wird als äquivalente Schubspannung in der Gleitfläche eingeführt.

Grundsätzlich sind zwei Bruchmechanismen des gestützten Deckwerks an einer Böschung möglich:

- **Bruchmechanismus 1:** Abscheren des Deckwerks in einer horizontalen Fuge durch den Böschungsfußpunkt (s. Bild 7.1)
- **Bruchmechanismus 2:** Versagen des Deckwerksfußes (s. Bild 7.2, Bild 7.3 und Bild 7.4).

Der Bruchmechanismus, der das größere Deckschichtgewicht ergibt, ist maßgebend. Welcher Bruchmechanismus dies ist, hängt von der Ausbildung des Deckwerksfußes ab.

7.2.5.2 Bruchmechanismus 1 am Böschungsfußpunkt

Im Bruchmechanismus 1 verläuft die Gleitfläche in Höhe der Oberkante des Deckwerksfußes (Böschungsfußpunkt) waagrecht durch das Deckwerk (Bild 7.1). Er ist von der Art der Fußausbildung unabhängig.

Bei geschichteten Böden kann diese Bruchfuge auch in Höhe einer Schichtgrenze verlaufen.

Für eine Deckschicht auf einem Kornfilter darf vereinfachend für die Wichte des Gesamtsystems der gewichtete Mittelwert der Einzelwichten von Deckschicht und Filter angenommen werden.

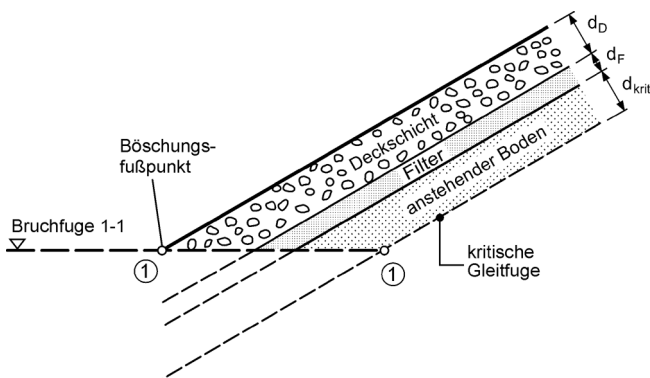


Bild 7.1 Bruchmechanismus 1 einer Fußstützung

Die aus einer Fußstützkraft resultierende äquivalente Schubspannung $\max \tau_{F1}$ unter der Böschungssicherung kann nicht größer werden, als für das Gleichgewicht in Böschungsfallrichtung erforderlich ist.

Das erforderliche Flächengewicht g' der Deckschicht bzw. die zugehörige Deckschichtdicke ergibt sich für den Bruchmechanismus 1 wie folgt:

Erforderliche Dicke der durchlässigen Deckschicht d_D für Bruchmechanismus 1 [m]

$$d_D = \sqrt{A^2 + \frac{B}{0,5 C \gamma'_D}} - A \quad (7-7)$$

mit den Hilfsfunktionen

- $A = (C \gamma'_D d_F - DE \gamma'_D) / C \gamma'_D$
- $B = DE (d_F \gamma'_F + d_{krit} \gamma') + DF - G$
- $C = \tan \varphi'_D \cos \beta$
- $D = (\cos \beta - \sin \beta \tan \varphi'_D) (h_W - z_a)$
- $E = \sin \beta - \cos \beta \tan \varphi'$
- $F = \Delta u \tan \varphi' - c'$
- $G = 0,5 d_F^2 \gamma'_F$

und mit den Symbolen

- c' effektive Kohäsion des Bodens [kN/m²]
- d_F Dicke des Filters [m]
- d_{krit} kritische Tiefe der Bruchfuge [m] nach Gl. (7-1)
- h_W Wassertiefe beim Ruhewasserspiegel [m]
- z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsenk [m] s. unter Gl. (7-1)
- β Böschungswinkel [°]
- γ'_D Wichte der Deckschicht unter Auftrieb [kN/m³]
- γ'_F Wichte des Filters unter Auftrieb [kN/m³] für geotextile Filter $\gamma'_F = 0$
- γ' Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m³]
- φ' effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]
- φ'_D Reibungswinkel des Deckschichtmaterials [°] bei nicht vergossenen Deckschichten $\varphi'_D = 55^\circ$
- Δu Porenwasserüberdruck [kN/m²] nach Gl. (5-107) für $z = d_{krit}$ nach Gl. (7-1)

Die aus der Scherung durch das Deckwerk maximal erreichbare äquivalente Schubspannung $\max \tau_{F1}$ in Böschungsfallrichtung ergibt sich zu:

Maximal erreichbare äquivalente Schubspannung
 $\max \tau_{F1}$ für Bruchmechanismus 1 [kN/m²]

$$\max \tau_{F1} = \frac{\left(\frac{1}{2} d_F^2 \gamma'_F + \left(d_D d_F + \frac{1}{2} d_D^2 \right) \gamma'_D \right) \tan \varphi'_D \cos \beta}{(\cos \beta - \sin \beta \tan \varphi'_D) (h_w - z_a)} \quad (7-8)$$

mit

d_D Dicke der Deckschicht [m]

d_F Dicke der Filterlage [m]

γ'_F Wichte des Filters unter Auftrieb [kN/m³]

$\max \tau_{F1}$ maximal erreichbare äquivalente Schubspannung [kN/m²] unter der Böschungssicherung für Bruchmechanismus 1

h_w Wassertiefe beim Ruhewasserspiegel [m]

z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsink [m]
 s. unter Gl. (7-1)

β Böschungswinkel [°]

γ'_D Wichte der Deckschicht unter Auftrieb [kN/m³]

φ'_D Reibungswinkel des Deckschichtmaterials [°]
 bei nicht vergossenen Deckschichten
 $\varphi'_D = 55^\circ$

7.2.5.3 Bruchmechanismus 2 bei einer Fußvorlage

Im Fall einer Fußvorlage verläuft im Bruchmechanismus 2 die kritische Gleitfläche unmittelbar unterhalb der Filterschicht entlang der Grenze zwischen Untergrund und Fußvorlage und keilt unter dem passiven Erddruckkörper vor der Fußvorlage in Höhe der Gewässersohle aus (s. Bild 7.2).

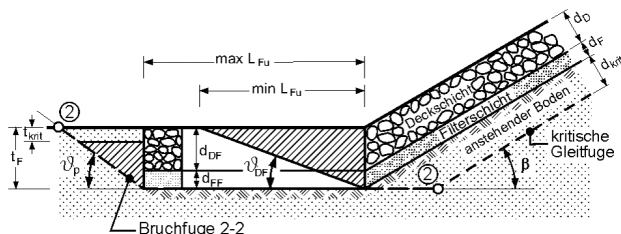


Bild 7.2 Bruchmechanismus 2 bei einer Böschungssicherung mit Fußvorlage

Der durch den Absink z_a erzeugte Porenwasserüberdruck in der Gewässersohle (s. 5.10) bewirkt eine aufwärts gerichtete instationäre Porenwasserströmung, die zur vorübergehenden Destabilisierung des Bodens an der Gewässersohle führt. Sie bewirkt unmittelbar nach Erreichen des maximal einwirken-

den Absinks z_a den Verlust der effektiven Spannung des Bodens an der Gewässersohle oberhalb der kritischen Tiefe t_{krit} , wodurch die stützende Wirkung des vor der Fußvorlage mobilisierbaren passiven Erddrucks reduziert wird /Köhler, Koenders 2003/. Die Differenz zwischen der Vertikalspannung aus dem potenziell aufschwimmenden Bodenkörper G' und dem zeitlich veränderlichen Porenwasserüberdruck $\Delta u(z)$ an der Gewässersohle ergibt ein Minimum in der kritischen Tiefe t_{krit} . Die überschüssige Energie aus der instationären Porenwasserströmung wird durch die einsetzende vertikale Bodenbewegung dissipiert.

Diese kritische Tiefe t_{krit} an der Sohle (aus Gl. (7-1) für Böschungswinkel $\beta = 0$) berechnet sich zu:

$$t_{krit} = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{b \gamma_w z_a}{\gamma'} \right) \geq 0 \quad (7-9)$$

Die aus der Fußvorlage maximal ansetzbare äquivalente Schubspannung $\max \tau_{F2}$ berechnet sich aus den zu fordernden Gleichgewichtsbedingungen (s. Anhang A) aller angreifenden Kräfte innerhalb und außerhalb des Böschungsfußstützkörpers (vgl. Bild 7.2), wobei gilt:

maximal erreichbare äquivalente Schubspannung
 $\max \tau_{F2}$ für Bemessungsfall 2 bei einer Fußvorlage [kN/m²]

(innerhalb)

$$\max \tau_{F2,i} = \frac{\left(d_{DF}^2 \gamma'_{DF} + d_{FF}^2 \gamma'_{FF} + 2 d_{DF} d_{FF} \gamma'_{DF} \right) \sin \beta}{\left[\cos \beta \cot (\varphi'_{DF} + \vartheta_{DF}) - \sin \beta \right] 2 \tan \vartheta_{DF} (h_w - z_a)} \quad (7-10)$$

bzw.

(außerhalb)

$$\max \tau_{F2,a} = \frac{\left[(\sigma'_v \tan \varphi' + c') L_{Fu} + E'_{ph} \right] \sin \beta}{(\cos \beta - \sin \beta \tan \varphi') (h_w - z_a)} \quad (7-11)$$

mit der Gleichung

$$\sigma'_v = \gamma'_{DF} d_{DF} + \gamma'_{FF} d_{FF}$$

und mit den Symbolen

b Porenwasserdruckparameter [1/m]
 nach Bild 5.51, abhängig von der Absinkgeschwindigkeit

- c' effektive Kohäsion des Bodens [kN/m²]
- d_{DF} Dicke der Steinschicht in der Fußvorlage [m]
- d_{FF} Dicke des Filters in der Fußvorlage [m]
- E'_{ph} horizontaler Anteil des passiven Erddrucks vor der Fußvorlage [kN/m]
- h_W Wassertiefe beim Ruhewasserspiegel [m]
- L_{Fu} Länge der Fußvorlage [m]
- $\max \tau_{F2}$ maximal übertragbare äquivalente Schubspannung [kN/m²] unter der Böschungssicherung infolge der Fußvorlage
- t_{krit} kritische Tiefe an der Gewässersohle [m]
- t_F Dicke der gesamten Fußvorlage [m]
- z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsenk [m]
s. unter Gl. (7-1)
- β Böschungswinkel [°]
- γ' Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m³]
- γ'_{DF} Wichte der Deckschicht in der Fußvorlage unter Auftrieb [kN/m³]
- γ'_{FF} Wichte des Kornfilters in der Fußvorlage unter Auftrieb [kN/m³]
für geotextile Filter in der Fußvorlage $\gamma'_{FF} = 0$
- γ_W Wichte des Wassers [kN/m³]
- ϑ_{DF} Gleitflächenwinkel des passiven Erddruckkeils innerhalb der Fußvorlage [°]
- ϑ_p Gleitflächenwinkel des passiven Erddruckkeils im Boden unmittelbar vor der Fußvorlage [°]
- σ'_v effektive Vertikalspannung [kN/m²]
- φ' effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]
- φ'_{DF} effektiver Reibungswinkel der Steinschüttung in der Fußvorlage [°]

Der Ansatz des Erdwiderstandes bei der Fußstützkraft ist nur zulässig, wenn nicht von einem Kolk vor der Fußvorlage auszugehen ist. Andernfalls darf der Erdwiderstand E'_{ph} im Zähler von Gl. (7-11) nicht angesetzt werden.

Beim Nachweis der inneren, maximal mobilisierbaren Schubspannung $\max \tau_{F2,i}$ im Falle einer Fußstützung ist der Reibungswinkel φ'_{DF} auf $\varphi'_{DF} = 35^\circ$ zu begrenzen, weil beim Ansatz von größeren Reibungswinkeln die benutzten Algorithmen für den starren Bruchmechanismus beim inneren Nachweis zu unkorrekten Ergebnissen führen.

Zunächst sind die Dicke $t_F = d_{DF} + d_{FF}$ und die Länge L_{Fu} der Fußvorlage festzulegen. Die Wahl der endgültigen Abmessungen für die Fußvorlage muss die nachfolgenden drei Bedingungen erfüllen:

- (1) Für die gewählte Dicke t_F ist die Sicherheit gegen Verflüssigung des Bodens nachzuweisen, um eine ausreichende Mindestdicke der Fußvorlage zu gewährleisten. Unter Einbeziehung der kritischen Tiefe t_{krit} unter der Gewässersohle ($\beta = 0$) gilt es, folgende Ungleichung zu erfüllen:

$$d_{DF} \geq \frac{\gamma_W z_a (1 - e^{-b t_{krit}}) - \gamma'_{FF} d_{FF} - \gamma' t_{krit}}{\gamma'_{DF}} \quad (7-12)$$

Für die gewählte Dicke t_F der Fußvorlage muss die erforderliche Mindestdicke der Deckschicht d_{DF} die oben angeführte Ungleichung erfüllen.

- (2) Die festzulegende Länge L_{Fu} der Fußvorlage ist so zu bestimmen, dass sie die maximal zulässige Länge ($\max L_{Fu}$) nicht überschreitet und die zum Nachweis der inneren Standfestigkeit erforderliche minimale Länge ($\min L_{Fu}$) gewährleistet.

Für die endgültige Festlegung der Länge L_{Fu} der Fußvorlage gilt

$$\left\{ \begin{array}{l} \min L_{Fu} \leq L_{Fu} \leq \max L_{Fu} \\ \max L_{Fu} = 4 t_F \\ \min L_{Fu} = \frac{t_F}{\tan \vartheta_{DF}} \end{array} \right. \quad (7-13)$$

mit der vereinfachenden und auf der sicheren Seite liegenden Annahme zur Bestimmung des passiven Gleitflächenwinkels ϑ_{DF} am passiven Erddruckkeil innerhalb der Fußvorlage (innerer Nachweis):

$$\vartheta_{DF} = 35^\circ \quad (7-14)$$

- (3) Der passive Erddruck vor der Fußvorlage E'_{ph} bestimmt sich mit dem maßgebenden Reibungswinkel φ' des Bodens an der Gewässersohle zu

$$E'_{ph} = (G' - U_v + C \sin \vartheta_p) \tan(\varphi' + \vartheta_p) + C \cos \vartheta_p \quad (7-15)$$

mit den Hilfsfunktionen

$$G' = \frac{(t_F - t_{krit})^2 \gamma'}{2 \tan \vartheta_p} \quad \text{und} \quad \vartheta_p = 45^\circ - \frac{\varphi'}{2}$$

$$C = \frac{c' (t_F - t_{krit})}{\sin \vartheta_p}$$

$$U_v = \frac{\gamma_W z_a}{\tan \vartheta_p} \left[\frac{e^{-b t_F} - e^{-b t_{krit}}}{b} + e^{-b t_{krit}} (t_F - t_{krit}) \right]$$

Beachte: nur anzusetzen für $U_v \geq 0$;
für $U_v < 0$ ist $U_v = 0$ zu setzen

und mit den Symbolen

- b Porenwasserdruckparameter [1/m] nach Bild 5.51, abhängig von der Absinkgeschwindigkeit
- c' effektive Kohäsion des Bodens [kN/m²]
- E'_{ph} horizontaler Anteil des passiven Erddrucks vor der Fußvorlage [kN/m]
- t_{krit} kritische Tiefe an der Gewässersohle [m]
- t_F Dicke der gesamten Fußvorlage [m]
- z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsink [m] s. unter Gl. (7-1)
- γ_w Wichte des Wassers [kN/m³]
- γ' Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m³]
- φ' effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]
- ϑ_p Gleitflächenwinkel des passiven Erddruckkeils im Boden unmittelbar vor der Fußvorlage [°]

- Δu Porenwasserüberdruck [kN/m²] nach Gl. (5-107) für $z = d_{krit}$ nach Gl. (7-1)
- z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsink [m] s. unter Gl. (7-1)
- β Böschungswinkel [°]
- γ' Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m³]
- γ'_D Wichte der Deckschicht unter Auftrieb [kN/m³]
- γ'_F Wichte des Filters unter Auftrieb [kN/m³] für geotextile Filter $\gamma'_F = 0$
- φ' effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]

Die von der Fußvorlage maximal übertragbare äquivalente Schubspannung $\max \tau_{F2}$ ergibt sich durch die Vergleichsberechnung aus dem äußeren und inneren Nachweis entsprechend den Gln. (7-10) und (7-11). Die jeweils kleinere der beiden errechneten Schubspannungen ist maßgebend und wird in der nachfolgenden Berechnung des erforderlichen Flächengewichts g' der Deckschicht auf der Böschung berücksichtigt:

Erforderliches Flächengewicht der durchlässigen Deckschicht g' bei einer Fußvorlage [kN/m²]

$$g' = \gamma'_D d_D = \frac{\max \tau_{F2} - \Delta u \tan \varphi' + c'}{\sin \beta - \cos \beta \tan \varphi' - (\gamma'_F d_F + d_{krit} \gamma')} \quad (7-16)$$

mit

- c' effektive Kohäsion des Bodens [kN/m²]
- d_D Dicke der Deckschicht [m]
- d_F Dicke des Filters [m]
- d_{krit} kritische Tiefe der Bruchfuge [m] nach Gl. (7-1)
- g' Kraftwirkung des erforderlichen Flächengewichts [kN/m²] der Deckschicht bei Bruchmechanismus 2
- $\max \tau_{F2}$ maximal übertragbare äquivalente Schubspannung [kN/m²] aus der Fußvorlage bei Bruchmechanismus 2

7.2.5.4 Bruchmechanismus 2 bei einer Fußeinbindung

Im Bruchmechanismus 2 bei der Fußeinbindung wird eine Bruchfläche untersucht, die im Boden unter dem Filter oder an der Grenzschicht zwischen Filter und Boden liegt und im Boden unter dem passiven Erdkeil verläuft (s. Bild 7.3). Der Porenwasserüberdruck wird auch auf das Deckwerk im Bereich der Fußeinbindung unterhalb der Gewässersohle angesetzt, da sich hier der Verfüllboden in den Porenraum setzen kann und sich somit im Deckwerk die Durchlässigkeit des Verfüllbodens einstellt.

Der schnelle Absink erzeugt im Bereich der horizontalen Gewässersohle einen Porenwasserüberdruck im Boden (s. 5.10) und infolge dessen eine Porenwasserströmung. Oberflächennah bewirkt diese Porenwasserströmung einen Verlust der effektiven Spannungen (Bodenverflüssigung) bis in die kritische Tiefe t_{krit} . In der Tiefe t_{krit} ist die auftreibende Kraft aus der Differenz zwischen dem Porenwasserüberdruck und der Vertikalspannung aus Bodeneigengewicht maximal. Durch die Bodenbewegung dissipiert die Energie aus der Porenwasserströmung. Die kritische Tiefe t_{krit} an der Sohle (Böschungswinkel $\beta = 0$) berechnet sich analog zu Gl. (7-9) aus

$$t_{krit} = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{b \gamma_w z_a}{\gamma'} \right) \geq 0 \quad (7-17)$$

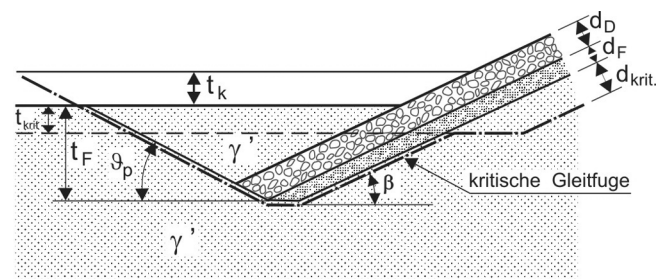


Bild 7.3 Bruchmechanismus 2 bei einer Böschungssicherung mit Fußeinbindung

Die maximal erreichbare äquivalente Schubspannung $\max \tau_{F2}$ berechnet sich aus den Gleichgewichtsbedingungen für den in Bild 7.3 dargestellten Gleitkeil.

maximal erreichbare äquivalente Schubspannung $\max \tau_{F2}$ für Bruchmechanismus 2 bei einer Fußeinbindung [kN/m²]

$$\begin{aligned} \max \tau_{F2} &= \frac{F_{F2}}{L_u} \geq 0 \\ L_u &= \frac{h_W - z_a + t_k + t_{krit}}{\sin \beta} \\ F_{F2} &= \frac{U_{v1} - G'_1 - C'_1 A}{B} + \frac{U_{v2} - G'_2}{D} + C'_2 \end{aligned} \quad (7-18)$$

mit den Hilfsfunktionen

$$A = \sin \vartheta_p + \cos \vartheta_p \cot(\varphi' + \vartheta_p)$$

$$B = \sin \beta - \cos \beta \cot(\varphi' + \vartheta_p)$$

$$D = \sin \beta - \cos \beta \cot(\varphi' - \beta)$$

$$U_{v1} = \frac{\gamma_W z_a}{\tan \vartheta_p} \left[\frac{e^{-bt_F} - e^{-bt_{krit}}}{b} + e^{-bt_{krit}} (t_F - t_{krit}) \right]$$

$$U_{v2} = \frac{\gamma_W z_a}{\tan \beta} \left[\frac{e^{-bt_F} - e^{-bt_{krit}}}{b} + e^{-bt_{krit}} (t_F - t_{krit}) \right]$$

$$G'_1 = \frac{\gamma'(t_F - t_{krit})^2}{2 \tan \vartheta_p}; \quad G'_2 = \frac{\gamma'(t_F - t_{krit})^2}{2 \tan \beta}$$

$$C'_1 = \frac{c'(t_F - t_{krit})}{\sin \vartheta_p}; \quad C'_2 = \frac{c'(t_F - t_{krit})}{\sin \beta}$$

$$\vartheta_p = \arctan \left(\sqrt{\frac{(1 + \tan^2 \varphi') \tan \varphi'}{\tan \varphi' + \tan \beta}} - \tan \varphi' \right)$$

und mit den Symbolen

s. unter Gl. (7-19)

Unter Berücksichtigung der maximal erreichbaren äquivalenten Schubspannung ergibt sich das erforderliche Flächengewicht in diesem Fall wie folgt:

erforderliches Flächengewicht der durchlässigen Deckschicht g' bei einer Fußeinbindung [kN/m²]

$$\begin{aligned} g' &= \gamma'_D d_D = \\ &= \frac{\Delta u \tan \varphi' - c' - \max \tau_{F2}}{\cos \beta \tan \varphi' - \sin \beta} - (\gamma'_F d_F + \gamma'_D d_{krit}) \end{aligned} \quad (7-19)$$

mit

- b Porenwasserdruckparameter [1/m] nach Bild 5.51, abhängig von der Absinkgeschwindigkeit
- c' effektive Kohäsion des Bodens [kN/m²]
- d_D Dicke der Deckschicht [m]
- d_F Dicke des Filters [m]
- d_{krit} kritische Tiefe im Böschungsbereich [m]
- h_W Wassertiefe beim Ruhewasserspiegel [m]
- t_F Tiefe der Fußeinbindung [m]
- t_k Kolkentiefe an der Gewässersohle vor dem Fuß des Deckwerks [m]
- t_{krit} kritische Tiefe an der Sohle [m]
- Δu Porenwasserüberdruck [kN/m²] nach Gl. (5-107) für $z = d_{krit}$ nach Gl. (7-1)
- z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsink [m] s. unter Gl. (7-1)
- β Böschungswinkel [°]
- γ' Bodenwichte unter Auftrieb [kN/m³]
- γ'_D Wichte der Deckschicht unter Auftrieb [kN/m³]
- γ'_F Wichte des Filters unter Auftrieb [kN/m³]
- γ_W Wichte des Wassers [kN/m³]
- φ' effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]
- ϑ_p Gleitflächenwinkel [°]
- $\max \tau_{F2}$ maximal übertragbare äquivalente Schubspannung aus der Fußeinbindung [kN/m²] nach Gl. (7-18)

Bei der Festlegung der Einbindetiefe t_F ist ggf. ein Kolk mit einer Tiefe von t_k nach örtlichen Erfahrungen gemäß Bild 7.3 zu berücksichtigen.

Bei der Ermittlung der erforderlichen Deckschichtdicke d_D können rechnerisch negative Werte auftreten. In diesem Fall ist für den Nachweis der Fußeinbindung kein Deckwerk erforderlich. Die Deckwerksdicke ergibt sich dann aus dem Bruchmechanismus 1.

7.2.5.5 Bruchmechanismus 2 bei einer Fußspundwand

Der Bruchmechanismus 2 besteht im Versagen einer eingespannten Fußspundwand als unterem Abschluss einer Böschungssicherung. Bei der Spundwandbemessung sind folgende Einflüsse zu berücksichtigen (s. Bild 7.4):

- (a) die am Spundwandkopf angreifende Fußstützkraft F in Fallrichtung der Deckschicht; F ergibt sich aus der für die gewählte Dicke d_D der Deckschicht noch erforderlichen Schubspannung $\text{erf } \tau_F$ nach Gl. (7-4) in Verbindung mit der folgenden Gleichung

$$F = \text{erf } \tau_F L_u \quad (7-20)$$

mit

h_W Wassertiefe beim Ruhewasserspiegel [m]

L_u Unterwasserlänge der Böschungssicherung [m]

$$L_u = \frac{h_W - z_a}{\sin \beta}$$

z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsenk [m]
s. unter Gl. (7-1)

β Böschungswinkel [°]

$\text{erf } \tau_F$ erforderliche Schubspannung bei einer Fußspundwand [kN/m²]
nach Gl. (7-4)

- (b) der aktive Erddruck E'_a im Boden unter der Böschungssicherung

- (c) eine Kolkentiefe t_k , die nach /MAR/ oder nach örtlichen Erfahrungen festzulegen ist

- (d) die kritische Tiefe t_{krit} , in der die Auftriebskraft aus der Differenz zwischen Porenwasserüberdruck und Bodeneigengewicht maximal ist

- (e) der resultierende Wasserüberdruck $u_b = \Delta u(\Delta t_k)$ mit $\Delta t_k > 0$ nach Bild 7.4

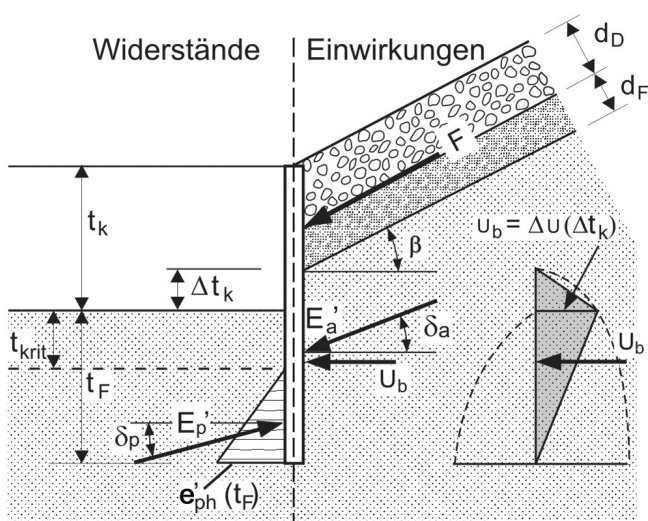


Bild 7.4 Fußstützung einer Böschungssicherung durch eine Spundwand (Bruchmechanismus 2)
Symbole: E'_a - aktiver Erddruck, E'_p - passiver Erddruck, F - Kraft aus Deckwerk, t_k - Kolkentiefe, U_b - Resultierende des Porenwasserüberdrucks

Die Bemessung der unverankerten Spundwand erfolgt für volle Einspannung nach /EAU 1996/. Der Spannungsnachweis ist bei Ansatz einer Kolkentiefe t_k für den Lastfall 2 /EAU 1996/ zu führen, wenn der Kolk nur von vorübergehender Dauer ist.

Bei der Ermittlung des Erdwiderstandes E'_p vor der Spundwand ist der Porenwasserüberdruck im Bereich der Gewässersohle analog zu Gl. (5-107) zu berücksichtigen. E'_p ist die entsprechend /DIN 4085/ unter dem Wandreibungswinkel $\delta_p = 2/3 \varphi'$ geneigte Resultierende des Erdwiderstandes.

Eine vereinfachte, auf der sicheren Seite liegende Ermittlung der horizontalen Erddruckkraft E'_{ph} kann über die Erddruckordinaten e'_{ph} nach der im Folgenden genannten Formel erfolgen, in der die Wirkung des Porenwasserüberdrucks infolge einer schnellen Wasserspiegelabsenkung enthalten ist. Der passive Erddruck kann über die Tiefe linear anwachsend angesetzt werden (s. Bild 7.4).

Erddruckordinate $e'_{ph}(t_F)$ [kN/m²]

$$e'_{ph}(t_F) = \frac{2E'_{ph} \cos \delta_p}{(t_F - t_{\text{krit}})^2} \quad (7-21)$$

mit den Hilfsfunktionen

$$E'_{ph} = \frac{U_v - G' - C'(\cos \vartheta_p \cot(\vartheta_p + \varphi') - \sin \vartheta_p)}{\sin \delta_p - \cos \delta_p \cot(\vartheta_p + \varphi')}$$

$$C' = \frac{c'(t_F - t_{\text{krit}})}{\sin \vartheta_p}$$

$$G' = \frac{\gamma'(t_F - t_{\text{krit}})^2}{2 \tan \vartheta_p}$$

$$U_v = \frac{\gamma_w z_a}{\tan \vartheta_p} \left[\frac{e^{-bt_F} - e^{-bt_{\text{krit}}}}{b} + e^{-bt_{\text{krit}}}(t_F - t_{\text{krit}}) \right]$$

$$\vartheta_p = \arctan \left(\sqrt{\frac{(1 + \tan^2 \varphi') \tan \varphi'}{\tan \varphi' + \tan \delta_p}} - \tan \varphi' \right)$$

$$t_{\text{krit}} = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{\gamma_w z_a b}{\gamma'} \right)$$

und mit den Symbolen

b Porenwasserdruckparameter [1/m]
für den Zeitpunkt des maximalen Absinks nach Bild 5.51

c' effektive Kohäsion des Bodens [kN/m²]

E'_{ph} horizontaler Anteil des passiven Erddrucks [kN/m²]

t Tiefe unter Gewässersohle [m]

- t_{krit} kritische Tiefe [m] an der Gewässersohle ($\beta = 0^\circ$)
- t_F Tiefe der Fußspundwand [m] (t_F ist größer als t_{krit} zu wählen)
- z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsenk [m] s. unter Gl. (7-1)
- γ' Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m^3]
- δ_p Wandreibungswinkel [$^\circ$], bei Spundwänden i. d. R. $\delta_p = 2/3 \varphi'$
- γ_w Wichte des Wassers [kN/m^3]
- φ' effektiver Reibungswinkel des Bodens [$^\circ$]
- ϑ_p Gleitflächenwinkel [$^\circ$]

In Gl. (7-21) ist der Porenwasserüberdruck Δu im Bereich des Erdwiderstandes bereits enthalten.

Der aktive Erddruck E'_a darf nach *IDIN 4085* mit der Wichte des Bodens unter Auftrieb ermittelt werden.

Der resultierende Wasserdruck auf der aktiven Seite darf vereinfacht in Form eines Dreiecks nach Bild 7.4 angesetzt werden, dessen Ordinate sich in Höhe der Kolksohle aus Gl. (5-107) für die Tiefe $z = \Delta t_k = t_k - (d_F + d_D) / \cos \beta$ und für den Absenkzeitpunkt $t = t_a$ ergibt.

Lässt sich die Fußspundwand für die unter (a) bis (c) genannten Einflüsse bemessen, ist die Standsicherheit der Deckschicht gewährleistet. Andernfalls muss das Gewicht der Deckschicht oder die Einbindetiefe und ggf. das Widerstandsmoment der Spundbohlen erhöht werden.

7.2.6 Flächengewicht der Deckschicht bei Berücksichtigung einer Deckwerksaufhängung

7.2.6.1 Allgemeines

Um die Standsicherheit eines Deckwerks zu erhöhen, kann die Deckschicht auch nach oben hin verankert werden ("aufgehängtes Deckwerk") (s. Bild 7.5). Derartige Aufhängungen können entweder aus einzelnen Ankern (Stahlseile, hochzugfeste Gewebebänder) oder aus hochzugfesten Flächenelementen bestehen.

Die aufzunehmende Zugkraft Z ergibt sich aus der erforderliche Schubspannung $\text{erf } \tau$ nach Gl. (7-4) in Abhängigkeit von der gewählten Deckwerksdicke d_D , multipliziert mit der Länge L_u der unter dem abgesenkten Wasserspiegel liegenden Deckschicht.

Die gleichzeitige Anwendung einer Fußstützung und einer oberen Verankerung bei einer Böschungssicherung wird nicht empfohlen.

Soll die Zugkraft Z durch das Gewicht der Deckschicht oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels

aufgenommen werden, sind folgende Nachweise zu führen:

- Nachweis der äußeren Tragfähigkeit (s. 7.2.6.2)
- Nachweis der inneren Tragfähigkeit (s. 7.2.6.3)

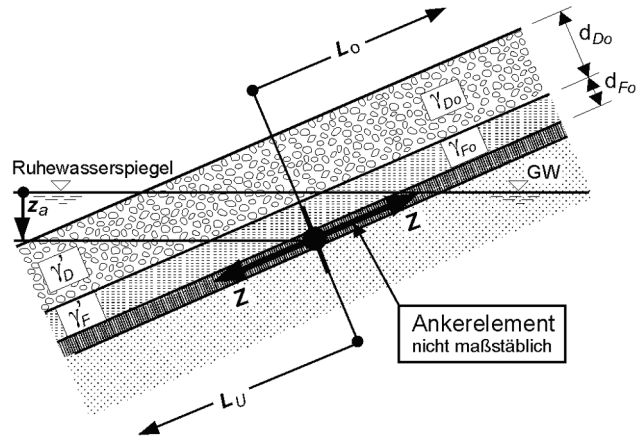


Bild 7.5 Systemskizze einer oberen Aufhängung einer Böschungssicherung

7.2.6.2 Nachweis der äußeren Tragfähigkeit

Wenn die Ankerkräfte oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels durch Reibung unter der Deckschicht in den Baugrund abgetragen werden, ist die äußere Tragfähigkeit wie im Folgenden dargestellt nachzuweisen. Das erforderliche Flächengewicht g' der Deckschicht ergibt sich zu:

erforderliches Flächengewicht der durchlässigen Deckschicht g' bei Berücksichtigung einer Deckwerksaufhängung [kN/m^2]

$$g' = \gamma_{D0} d_{D0} = \frac{Z \cos \varphi'_{AB} - c'_{AB} L_o \cos \varphi'_{AB} - \gamma_{F0} d_{F0}}{L_o \sin(\varphi'_{AB} - \beta)} \quad (7-22)$$

mit den Größen

$$Z = \text{erf } \tau_A L_u$$

$$L_u = \frac{h_w + t_k - z_a}{\sin \beta}$$

und mit den Symbolen

- c'_{AB} Kohäsion/Adhäsion zwischen Zugelement und Boden über dem abgesenkten Wasserspiegel [kN/m^2]
- d_{D0} Dicke der Deckschicht oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels [m]
- d_{F0} Dicke eines mineralischen Filters oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels [m]

erf τ_A	erforderliche zusätzliche stützende Schubspannung [kN/m ²] erf $\tau_A = \text{erf } \tau$ nach Gl. (7-4)
L_u	Länge der Böschungssicherung unterhalb des abgesenkten Wasserspiegels [m]
L_o	Länge der Böschungssicherung über dem abgesenkten Wasserspiegel [m]
h_W	Wassertiefe bei Ruhewasserspiegel [m]
t_k	Kolkentiefe vor dem Fuß des Deckwerks an der Gewässersohle [m], festzulegen nach örtlichen Erfahrungen
z_a	maximaler schneller Wasserspiegelabsenk [m] s. unter Gl. (7-1)
Z	aufzunehmende Zugkraft einer Deckwerksaufhängung [kN/m]
β	Böschungswinkel [°]
γ_{Do}	Wichte der Deckschicht über dem abgesenkten Wasserspiegel [kN/m ³]
γ_{Fo}	Wichte eines mineralischen Filters oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels [kN/m ³]
ϕ'_{AB}	wirksamer Reibungswinkel [°] zwischen Zug-element und Boden oder Zugelement und Deckschicht über dem abgesenkten Wasserspiegel; der kleinere Wert ist maßgebend

Andere Lastabtragungen als über Reibung im Deckwerk (z. B. Einbindegraben) sind gesondert für die Zugkraft Z nachzuweisen.

7.2.6.3 Nachweis der inneren Tragfähigkeit

Die innere Tragfähigkeit der Verankerung ist nach den Bemessungsansätzen für Bewehrungselemente nachzuweisen, wie z. B. mit dem Spannungsnachweis bzw. Grenzzustand 1B nach dem Sicherheitskonzept der Teilsicherheitsbeiwerte gemäß Kap. 4.3.2 in *!DIN 1054!*. Die Gebrauchsfestigkeit von Geokunststoffen darf 2 % der Bruchdehnung nach *!DIN EN ISO 10319!* nicht überschreiten.

Ergibt sich eine zu große Dicke d_{Do} der Deckschicht oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels, dann kann zur Verminderung der aufzunehmenden Zugkraft das Flächengewicht der Deckschicht d_D unterhalb des abgesenkten Wasserspiegels erhöht werden. Sofern der Nachweis der inneren Tragfähigkeit dies zulässt, kann auch eine Verankerung der Zug-elemente in einem Graben an der Schulter der Uferböschung entsprechend den Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen *!EBGEO!* vorgenommen werden.

7.2.7 Böschungssicherung oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels

Die Standsicherheit einer Uferböschung oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels ist gewährleistet, wenn das für den Erosionsschutz erforderliche Deckwerk bis zum höchsten Wellenauflaufpunkt nach 5.8.6 aufgebracht wird.

Tritt bei Uferböschungen im stationären Zustand Grundwasser oberhalb der Böschungssicherung aus der Böschung aus, dann ist die lokale Standsicherheit des durchströmten, oberflächennahen Böschungsbereiches gewährleistet, wenn für die ungeschützte Böschung aus kohäsionslosem Material folgende Bedingung erfüllt ist (s. 3.5):

$$\beta < \frac{\phi'}{2}$$

mit

β Böschungswinkel oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels [°]

ϕ' effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]

Soweit diese Bedingung nicht erfüllt ist, sind geeignete andere Maßnahmen zur Verhinderung von Schäden erforderlich, sofern die Böschungssicherung nicht über den Bereich des Sickerwasseraustritts hochgezogen werden soll.

Bindige Böden sind in dieser Hinsicht immer stand-sicher.

7.3 Lokale Standsicherheit dichter Deckwerke

7.3.1 Allgemeines

Kann der Grundwasserspiegel über dem abgesenkten Kanalwasserspiegel liegen, muss das dichte Deckwerk auf den maximal möglichen Wasserüberdruck bemessen werden.

Das Flächengewicht eines dichten Deckwerks muss so groß sein, dass der Überdruck unter der Dichtung nicht zu einem lokalen Abgleiten auf der Böschung bzw. Abheben an der Sohle führt.

Ist die Dichtung einer Böschung in der Lage, Längskräfte aufzunehmen und zur Sohle weiterzuleiten, muss das Deckwerksgewicht ausreichend sein, um auch ein Abheben zu verhindern.

7.3.2 Flächengewicht der dichten Deckschicht gegen Abgleiten

Das erforderliche Flächengewicht der Deckschicht einer dichten Böschungssicherung ohne zusätzliche Stützung gegen Abgleiten errechnet sich wie folgt:

erforderliches Flächengewicht der dichten Deckschicht g' gegen Abgleiten [kN/m²]

$$g' = \gamma'_D d_D + \gamma'_F d_F + \gamma'_{Di} d_{Di} = \frac{\Delta u \tan \varphi' - c'}{\cos \beta \tan \varphi' - \sin \beta} \quad (7-23)$$

mit der Gleichung

$$\Delta u = (\Delta h_W + z_a) \gamma_W \quad (7-24)$$

und mit den Symbolen

- c' effektive Kohäsion des Bodens [kN/m²]
- d_D Dicke der Deckschicht [m]
- d_{Di} Dicke der Dichtungsschicht [m]
- d_F Dicke des Filters [m]
- g' Flächengewicht der Deckschicht [kN/m²]
- Δu Porenwasserüberdruck unter der Dichtung [kN/m²]
- z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsenk [m]
s. unter Gl. (7-1)
- β Böschungswinkel [°]
- Δh_W Höhenunterschied [m] zwischen Grundwasserspiegel und Ruhewasserspiegel in der Wasserstraße: positiv, wenn der Grundwasserspiegel über dem Ruhewasserspiegel liegt
- γ'_D Wichte der Deckschicht unter Auftrieb [kN/m³]
- γ'_{Di} Wichte des Dichtungsmaterials unter Auftrieb [kN/m³]
- γ'_F Wichte des Filters unter Auftrieb [kN/m³]
- γ_W Wichte des Wassers [kN/m³]
- φ' effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]

Es ist zu untersuchen, ob eine Scherfuge im Boden oder in der Dichtung maßgeblich wird. Die Festigkeit der Dichtung ist als undränierter Scherfestigkeit einzuführen.

7.3.3 Flächengewicht der dichten Deckschicht gegen Abheben

Bei einem dichten Deckwerk an der Sohle oder bei ausreichender Fußstützung eines dichten Deckwerks an der Böschung muss der Nachweis eines ausreichenden Flächengewichts gegen Abheben erbracht werden.

Das erforderliche Flächengewicht g' der Deckschicht eines dichten Deckwerks gegen Abheben ergibt sich zu:

erforderliches Flächengewicht der dichten Deckschicht g' gegen Abheben [kN/m²]

$$g' = \gamma'_D d_D + \gamma'_F d_F + \gamma'_{Di} d_{Di} \geq \frac{\Delta u \gamma_A}{\cos \beta} \quad (7-25)$$

mit

- d_D Dicke der Deckschicht [m]
- d_{Di} Dicke der Dichtungsschicht [m]
- d_F Dicke des Filters [m]
- g' Flächengewicht der Deckschicht [kN/m²]
- Δu Porenwasserüberdruck unter der Dichtung [kN/m²] nach Gl. (7-24)
- z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsenk [m]
s. unter Gl. (7-1)
- β Böschungswinkel [°]
- Δh_W Höhenunterschied [m] zwischen Grundwasserspiegel und Ruhewasserspiegel in der Wasserstraße: positiv, wenn der Grundwasserspiegel über dem Ruhewasserspiegel liegt
- γ_A Sicherheit gegen Auftrieb [-]
 $\gamma_A = 1,20$
- γ'_D Wichte der Deckschicht unter Auftrieb [kN/m³]
- γ'_{Di} Wichte des Dichtungsmaterials unter Auftrieb [kN/m³]
- γ'_F Wichte des Filters unter Auftrieb [kN/m³].

7.4 Nachweis der globalen Standsicherheit der wasserseitigen Böschung

Die globale Standsicherheit der wasserseitigen Böschung einschließlich Deckwerk oder sonstiger Auflasten ist mit den Sicherheiten nach *IDIN 1054/* und den Verfahren nach *IDIN 4084/* (Böschungsbruch) nachzuweisen. Es sind Bruchmechanismen zu untersuchen, die vom Versagen des Deckwerks entsprechend 7.2 und 7.3 (Abgleiten bzw. Abheben böschungparalleler Bruchkörper in der Tiefe d_{krit} nach 7.2.2 bzw. unter einer Dichtung) abweichen. Dies sind i. d. R. Bruchkörper mit Gleitlinien, die über ihre Länge größtenteils deutlich (einige Dezimeter und mehr) unterhalb der kritischen Tiefe d_{krit} in die Böschung einschneiden.

Nachzuweisen ist der Grenzzustand GZ 1C nach Kap. 4.3.3 in *IDIN 1054/* für folgende Fälle:

- (a) Betriebswasserstand BW bzw. Mittelwasser MW ohne Wasserspiegelabsenk mit den Teilsicherheitsbeiwerten für den Lastfall 1 nach *IDIN 1054/*

- (b) Schneller Wasserspiegelabsenk (i. d. R. infolge Schiffspassage, aber ggf. auch nach schnell ablaufender Hochwasserwelle) mit Ansatz eines Porenwasserdrucks auf die Gleitlinie ohne Berücksichtigung des Porenwasserüberdrucks aus 5.10, zu untersuchen für den Lastfall 3 nach */DIN 1054/*
- (c) Ansatz des Porenwasserüberdrucks nach 5.10 auf den maßgeblichen Bruchkörper aus (b) mit dem Nachweis, dass der Grenzzustand mit Teilsicherheitsbeiwerten der Scherparameter von $\gamma_{\varphi} = \gamma_c = 1,0$ eingehalten wird

8 Hydraulische Bemessung von Deckschichten aus Wasserbausteinen mit Teilverguss

Aus Naturversuchen und nach den bisherigen Erfahrungen besitzen teilvergossene Deckschichten der Steinklassen I - III nach /MAV/ mit den in /MAV/ angegebenen Vergussstoffmengen und Ausführungsvorschriften bei flächenhafter Verteilung des Vergussstoffes an der Oberfläche und bei einer Vergussstoffverteilung in der Tiefe nach /MAV/ einen ausreichenden Widerstand gegen alle bisher bekannten an Wasserstraßen auftretende hydraulischen Beanspruchungen. Eine hydraulische Bemessung erübrigt sich hierbei, solange die höchste auftretende Strömungsgeschwindigkeit $\leq 7,7$ m/s ist /LWI 1998/, was i. d. R. zutrifft.

Aus den bisherigen Erfahrungen kann eine ausreichende Sicherheit gegen Ankerwurf und Ankerfurchung im Bereich der Binnenschiffahrt abgeleitet werden, wenn die Deckschicht mindestens 40 cm dick ist und die Vergussmenge nach /MAV/ gewählt wurde.

9 Geotechnische Bemessung von Deckschichten aus Wasserbausteinen mit Teilverguss

9.1 Allgemeines

Bei einem nach /MAR/ und /MAV/ hergestellten Verguss kann vereinfachend mit einem Reibungswinkel der Gesamtscherfestigkeit von $\phi'_D = 70^\circ$ gerechnet werden. Bei der Berechnung der Wichte des Deckwerks kann die Vergussmenge wie folgt mit eingerechnet werden.

Flächengewicht eines teilvergossenen Deckwerks unter Auftrieb g' [kN/m²]

$$g' = (1-n)(\gamma_D - \gamma_W) d_D + \frac{m_V}{1000} (\gamma_V - \gamma_W) \quad (9-1)$$

mit

- d_D Dicke des Deckwerks [m]
- g' Flächengewicht eines teilvergossenen Deckwerks unter Auftrieb [kN/m²]
- m_V Vergussmenge [l/m²]
(Nenner 1000 wg. Umrechnung l \rightarrow m³)
- n Porenanteil des unvergossenen Deckwerks [-]
nach 7.2.3.2

- γ_D Wichte der Deckschicht [kN/m³]
- γ_V Wichte des Vergussstoffs [kN/m³]
i. d. R. $\gamma_V = 22$ kN/m³
- γ_W Wichte des Wassers [kN/m³]

9.2 Lokale Standsicherheit durchlässiger Deckwerke mit teilvergossenen Deckschichten

Bei der geotechnischen Bemessung von Deckschichten mit Teilverguss ist

- eine ausreichende Sicherheit gegen hydrodynamische Bodenverlagerung unter dem Deckwerk nach 7.2.4 und
- eine ausreichende Sicherheit der Böschung oberhalb des Deckwerks nach 7.2.7

nachzuweisen.

Anmerkung: Dynamische hydraulische Lasten auf Deckschichten aus Schiffsvorbeifahrten sind in ihrer Ausdehnung begrenzt. Bei teilvergossenen Deckschichten ist der innere Verbund ausreichend hoch, um Kräfte in seitliche unbelastete Bereiche abzutragen. Aus diesem Grund sind die Nachweise gegen Abgleiten und Abscheren durch die Deckschicht nicht erforderlich.

Eine Fußeinbindung (Fußverlängerung nach /MAR/) ist aus Kolkchutzgründen notwendig.

9.3 Lokale Standsicherheit dichter Deckwerke mit teilvergossenen Deckschichten

Bei der geotechnischen Bemessung von Deckschichten mit Teilverguss über einer Dichtungsschicht ist eine ausreichende Sicherheit

- gegen Abgleiten des Deckwerks auf der Böschung nach 7.3.2 und
 - gegen Abheben des Deckwerks nach 7.3.3
- nachzuweisen.

9.4 Nachweis der globalen Standsicherheit der wasserseitigen Böschung

Die globale Standsicherheit der Böschung ist nach 7.4 nachzuweisen.

10 Literaturverzeichnis

- /Abromeit 1997/* Abromeit, H.-U.
Ermittlung technisch gleichwertiger Deckwerke an Wasserstraßen und im Küstenbereich in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte der verwendeten Wasserbausteine
Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 75,
Eigenverlag, Karlsruhe
- /Abromeit 2004/* Abromeit, H.-U.
Anpassung der Technischen Lieferbedingungen für Wasserbausteine (TLW) an die neue DIN EN 13383 - Wasserbausteine
BAW-Brief Nr. 1 – März 2004
Eigenverlag, Karlsruhe
- /ACER 1992/* US Department of the Interior, Bureau of Reclamation
Freeboard criteria and guidelines for computing freeboard allowances for storage dams
Eigenverlag, Denver 1992
- /BAW 2004/* Bundesanstalt für Wasserbau (Hrsg.)
Fahrversuche am Wesel-Datteln-Kanal zur Frage der Sohlen- und Deckwerksstabilität bei Schifffahrt (Arbeitstitel)
z. z. in Arbeit
Karlsruhe, voraussichtlich 2004
- /Binek, Müller 1991/* Binek, H., Müller, E.
Bestimmung der Wassertiefenabhängigkeit des Formfaktors eines Ein-Schrauben-Binnenschiffes
Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V.
Eigenverlag, Duisburg 1991
- /Blaauw et al. 1984/* Blaauw, H. G.; van der Knaap, F. C. M.; de Groot, M. T.; Pilarczyk, K. W.
Design of bank protection of inland navigation fairways
International conference on flexible armoured revetments incorporating geotextiles
Publ. No. 320
London 1984
- /Blaauw, Kaa 1978/* Blaauw, H. G.; van de Kaa, E. J.
Erosion of bottom and sloping banks caused by the screw race of manoeuvring ships
WL publication 202; 1978

- /Blokland 1994/* Blokland, T.
In-situ tests of current velocities and stone movements caused by a propeller jet against a vertical quay wall
Rotterdam public works 1994
- /BMV 1994/* Bundesministerium für Verkehr
Richtlinien für Regelquerschnitte von Schifffahrtskanälen
Eigenverlag, Bonn 1994
- /BMV 1996/* Bundesministerium für Verkehr
Bundeswasserstraßenkarte
Drucksachenstelle der WSV
Hannover 1996
- /Bouwmeester 1977/* Bouwmeester, J.
Recent studies on push-towing as a base for dimensioning waterways
Publication No. 194, 39 p.
Delft Hydraulic Laboratory
Eigenverlag, Delft 1977
- /CEM 2002/* US Army Corps of Engineers
Coastal engineering manual
USACE Internet Publishing Group
April 2002
- /CUR-TAW 1992/* Centre for civil engineering research and codes (CUR),
Technical advisory committee on water defences (TAW)
Guide for design of river dikes
Volume 1 - upper river area
Report 142
Eigenverlag, Gouda/NL 1992
- /Daemrich 1978 a/* Daemrich, K. F.
Diffraktion gebeugter Wellen
- Ein Beitrag zur Berechnung der Wellenunruhe in Häfen
Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen
Technische Universität Hannover
Heft 47, S. 1-157
Eigenverlag, Hannover 1978

- /Daemrich 1978 b/* Daemrich, K. F.
**Diffraction an halbumendlichen Wellenbrechern
- Diagramme der Wellenhöhenverteilung hinter totalreflektierenden linien-
förmigen Bauwerken**
Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen
Technische Universität Hannover
Heft 47, S. 196-213
Eigenverlag, Hannover 1978
- /Dand, White 1978/* Dand, J. W.; White, W. R.
Design of navigation canals
Symposium on aspects of navigability of constraint waterways including harbour
entrances
Delft 1978
- /Davidenkoff 1964/* Davidenkoff, R.
Deiche und Erddämme, Sickerströmung-Standsicherheit
Werner Verlag, Düsseldorf 1964
- /Dettmann 1998/* Dettmann, T.
**Ein Beitrag zur Berechnung von Fahrrinnenverbreiterungen in Kanal- und
Flusskrümmungen bei niedrigen Fließgeschwindigkeiten**
Binnenschifffahrt Nr. 23, S. 38-40
Dezember 1998
- /Dettmann,
Jurisch 2001/* Dettmann, T.; Jurisch, R.
Beitrag zur Bemessung von Fahrrinnenbreiten in Kanälen und Flüssen
Binnenschifffahrt Nr. 6, S. 72-75
Juni 2001
- /Dietz 1973/* Dietz, J. W.
Sicherung der Flusssohle unterhalb von Wehren und Sperrwerken
Wasserwirtschaft 63 (1973) 3, S. 76-83
- /DIN 1054/* Deutsches Institut für Normung (Hrsg.)
Zulässige Belastung des Baugrunds
Beuth-Verlag, Berlin
- /DIN 4020/* Deutsches Institut für Normung (Hrsg.)
Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke
Beuth-Verlag, Berlin

- /DIN 4084/* Deutsches Institut für Normung (Hrsg.)
Gelände- und Böschungsbruchberechnungen
Beuth-Verlag, Berlin
- /DIN 4085/* Deutsches Institut für Normung (Hrsg.)
Berechnung des Erddrucks
Beuth-Verlag, Berlin
- /DIN 18196/* Deutsches Institut für Normung (Hrsg.)
Erd- und Grundbau; Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke
Beuth-Verlag, Berlin
- /DIN EN 13383/* Deutsches Institut für Normung (Hrsg.)
Wasserbausteine
Teil 1 und Teil 2
Beuth-Verlag, Berlin
- /DIN EN ISO 10319/* Deutsches Institut für Normung (Hrsg.)
Geotextilien- Zugversuch am breiten Streifen
ISO 10319:1993; Deutsche Fassung EN ISO 10319:1996
Beuth-Verlag, Berlin
- /Dittrich 1998/* Dittrich, A.
Wechselwirkungen Morphologie/Strömung naturnaher Fließgewässer
Mitteilungen aus dem Institut für Wasserbau und Kulturtechnik,
Universität Karlsruhe, Heft 198
Eigenverlag, Karlsruhe 1998
- /Ducker,
Miller 1996/* Ducker, H. P.; Miller, C.
Harbour bottom erosion at berths due to propeller jets
Proceedings of the 11th International Harbour Congress
Antwerpen, 1996
- /DVPFIX 2002/* **Programmdokumentation DVPFIX**
Institut für Energie- und Umwelttechnik, Universität Rostock 2002
- /DVWK 118/* Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V., DVWK (Hrsg.)
Maßnahmen zur naturnahen Gewässerstabilisierung
DVWK Schriften, Heft 118
Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft mbH, Bonn 1997

- /DVWK 246/* Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V., DVWK (Hrsg.)
Freibordbemessung an Stauanlagen
DVWK Schriften, Heft 246
Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn 1997
- /EAK 1993/* Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau (DGEG),
Hafenbautechnische Gesellschaft (HTG)
Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzbauwerken
Die Küste
Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide in Holstein 1993
- /EAK 2002/* Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT), Hafenbautechnische
Gesellschaft e.V. (HTG)
Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken
Die Küste, Heft 65, 2002
- /EBGEO/* Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT)
Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen
Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1997
- /EAU 1996/* Hafenbautechnische Gesellschaft e. V. (HTG), Deutsche Gesellschaft für
Geotechnik e. V. (DGGT)
Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen"
Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1997
- /Fuehrer,
Römisch 1985/* Fuehrer, M.; Römisch, K.
**Dimensionierung von Sohlen- und Böschungsbefestigungen an Schiffahrts-
kanälen**
Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau
Schriftenreihe Wasser- und Grundbau, Nr. 47, Berlin 1985
- /Führböter 1974/* Führböter, A.
Einige Ergebnisse aus Naturuntersuchungen in Brandungszonen
Mitteilungen aus dem Leichweiß-Institut für Wasserbau, Universität Braunschweig,
Heft 40/74
Eigenverlag, Braunschweig 1974
- /Führböter et al. 1983/* Führböter, A.; Dette, H. H.; Jensen, J.
**Ergebnisse von Wind- und Schiffswellenmessungen an der Unterelbe in den
Jahren 1980/1981**
Bericht Nr. 546 (unveröffentlicht)
Leichtweiß-Institut, Universität Braunschweig
Eigenverlag 1983

- /Gates, Herbich 1977/* Gates, E. T.; Herbich, J. B.
Mathematical model to predict the behavior of deep-draft vessels in restricted waterways
Texas A and M University, Sea Grant College
Report TAMU-SG-77-206, 1977
- /Gaudio, Marion 2003/* Gaudio, R.; Marion, A.
Time evolution of scouring downstream of bed sills
Journal of Hydraulic Research
Vol. 41, No. 3 (2003), pp. 271 -284
- /Henschke 1952/* Henschke, W.
Schiffbautechnisches Handbuch
Verlag Technik, Berlin 1952
- /Horn 1928/* Horn, F.
Theorie des Schiffes
in: „Mechanik der Flüssigkeiten nebst technischen Anwendungsgebieten“
von Auerbach, F.; Hort, W.
S. 552-718
Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig 1928
- /Hudson 1959/* Hudson, R. Y.
Laboratory investigations of rubble mound breakwaters
Journal of Waterways and Harbours
ASCE, New York 1959
- /Jansen, Schijf 1953/* Jansen, P. Ph.; Schijf, J. B.
ohne Titel
PIANC's 18th International Navigation Congress
Section I - Communication I, pp. 175 - 197
Eigenverlag, Rom 1953
- /Knieß 1977/* Knieß, H.-G.
**Bemessung von Schüttsteindeckwerken im Verkehrswasserbau
Teil 1: Lose Steinschüttungen**
Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 42
Eigenverlag, Karlsruhe 1977
- /Kuhn 1985/* Kuhn, R.
Binnenverkehrswasserbau
Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1985

- /Köhler 1989/* Köhler, H.-J.
Messung von Porenwasserüberdrücken im Untergrund
Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 66, S. 155 - 174
Eigenverlag, Karlsruhe 1989
- /Köhler 1993/* Köhler, H.-J.
The influence of hydraulic head and hydraulic gradient on the filtration process
in: "Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering"
Proceedings of the 1st International Conference 'Geofilters'
Karlsruhe 1992, pp. 225 - 240
A. A. Balkema Verlag, Rotterdam 1993
- /Köhler 1997/* Köhler, H.-J.
Boden und Wasser - Druck und Strömung
Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 76, S. 15 - 33
Eigenverlag, Karlsruhe 1997
- /Köhler,
Koenders 2003/* Köhler, H.-J.; Koenders, M. A.
Direct visualization of underwater phenomena in soil-fluid interaction and analysis of the effects of an ambient pressure drop on unsaturated media
Journal of Hydraulic Research, Vol. 41, Issue 1 (2003), pp. 69 – 78
- /Kohlhase 1983/* Kohlhase, S.
Ozeanographisch-seebauliche Grundlagen der Hafenplanung
Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der
Universität Hannover
Eigenverlag, Hannover 1983
- /Kriebel 2003/* Kriebel, D.
Development of unified description of ship generated waves
U. S. Section PIANC Annual Meeting
27. – 30. Oktober 2003, Portland, Oregon/USA
Passing Vessel Issues Workshop
- /Le Méhauté 1976/* Le Méhauté, B.
An introduction to hydrodynamics and water waves
Springer-Verlag, Berlin 1976
- /LWI 1998/* N.N.
Stabilität von verklammerten Deckwerken
Bericht Nr. 833
Leichtweiß-Institut für Wasserbau / TU Braunschweig, August 1998

- /MAG/* Bundesanstalt für Wasserbau
Merkblatt Anwendungen von geotextilen Filtern an Wasserstraßen
Eigenverlag, Karlsruhe 1993
- /MAK/* Bundesanstalt für Wasserbau
Merkblatt Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen
Eigenverlag, Karlsruhe 1989
- /MAR/* Bundesanstalt für Wasserbau
Merkblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen
Eigenverlag, Karlsruhe 1993
- /MAV/* Bundesanstalt für Wasserbau
Merkblatt Anwendung von hydraulisch- und bitumengebundenen Stoffen zum Verguß von Wasserbausteinen
Eigenverlag, Karlsruhe 1990
- /Oosterveld,
Oossanen 1975/* Oosterveld, M. W. C.; van Oossanen, P.
Further computer-analysed data of the Wageningen B-Screw Series
International shipbuilding progress, Vol 22, No. 251. July 1975, pp. 251-262
- /Peters 2002/* Peters, H.-E.
Stellungnahme und Vorschläge zur Abschätzung der Strahlgeschwindigkeit von Propellern und Düsenpropellern
Ausarbeitung im Auftrag der BAW (unveröffentlicht)
Rostock 2002
- /PIANC 1987a/* Permanent International Association of Navigation Congresses - PIANC (Hrsg.)
Guidelines for the design and construction of flexible revetments incorporating geotextiles for inland waterways
Report of the Working Group 4 of the Permanent Technical Committee I
Supplement to Bulletin No. 57
Eigenverlag, Brüssel 1987
- /PIANC 1987b/* Permanent International Association of Navigation Congresses - PIANC (Hrsg.)
Risk consideration when determining bank protection requirements
Supplement to Bulletin No. 87, 1987, pp. 202 ff.
Eigenverlag, Brüssel 1987

- /PIANC 1992/* Permanent International Association of Navigation Congresses - PIANC (Hrsg.)
Guidelines for the design and construction of flexible revetments incorporating geotextiles in marine environment
Report of Working Group 21 of the Permanent Technical Committee II
Supplement to Bulletins Nos. 78/79, 1992
- /Pilarczyk 1990/* Pilarczyk, K.W.
Design of seawalls and dikes including overview of revetments
Proceedings of the short course on coastal protection
Balkema, Rotterdam 1990
- /Poweleit 1985/* Poweleit, A.
Bemessung des Freibords im Erddammbau
Wasserwirtschaft 75 (1985) 10, S. 434-439
- /Press,
Schröder 1966/* Press, H.; Schröder, R.
Hydromechanik im Wasserbau
Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1966
- /PROFIX 2002/* **Programmdokumentation PROFIX**
Institut für Energie- und Umwelttechnik, Universität Rostock 2002
- /Przedwojski
et al. 1995/* Przedwojski, B.; Blazejewski, R.; Pilarczyk, K. W.
River training techniques - fundamentals, design and application
Balkema, Rotterdam 1995
- /Römisch 1975/* Römisch, K.
Der Propellerstrahl als erodierendes Element bei An- und Ablegemanövern in Hafenbecken
Seewirtschaft Heft 7 (1975)
Berlin
- /Römisch 1989/* Römisch, K.
Empfehlungen zur Bemessung von Hafeneinfahrten
Technische Universität Dresden, Sektion Wasserwesen
Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 1, S. 2-84
Eigenverlag, Dresden 1989
- /Römisch 1994/* Römisch, K.
Propellerstrahlinduzierte Erosionserscheinungen
HANSA – Schifffahrt – Schiffbau – Hafen
Nr. 9 / 1994 (131. Jg.), S. 231-234

- /RPG/* Bundesanstalt für Wasserbau
Richtlinien für die Prüfung von Geotextilien im Verkehrswasserbau
Eigenverlag, Karlsruhe 1994
- /Schäle, Mollus 1971/* Schäle, E.; Mollus, G.
Bildbericht über die Versuche auf Rhein und Main sowie in den Haltungen Hausen und Kriegenbrunn
Kanal- und Schifffahrtsversuche, 3. Folge
Versuchsanstalt für Binnenschiffbau, Duisburg 1971
- /Schokking 2002/* Schokking, L. A.
Bowthruster-induced damage
Master of Science Thesis
TU Delft 2002
- /Schuster 1952/* Schuster, S.
Untersuchungen über die Strömungs- und Widerstandsverhältnisse bei der Fahrt von Schiffen in beschränktem Wasser
Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft 1952
- /Söhngen 1992/* Söhngen, B.
Dimensionierung von Fahrrinnenquerschnitten im Rahmen der Planung von Staustufen
13. Duisburger Kolloquium für Schiffs- und Meerestechnik, Mai 1992
- /Söhngen, Koll 1997/* Söhngen, B.; Koll, K.
Bemessung von Sohlendeckwerken unter starkem Strömungsangriff
in DVWK-Schrift 118, 1997
- /SPM 1977/* Department of the Army, Waterways Experiment Station (WES)
Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center
Shore Protection Manual, Vol. 1, 2
Eigenverlag, Vicksburg 1977
- /SPM 1984/* Department of the Army, Waterways Experiment Station (WES)
Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center
Shore Protection Manual, Vol. 1, 2
Eigenverlag, Vicksburg 1984
- /TLW/* Bundesministerium für Verkehr
Technische Lieferbedingungen für Wasserbausteine
Eigenverlag, Bonn 1997 bzw. 2003

- /Verhey,
Bogaerts 1989/* Verhey, H. J.; Bogaerts, M. P.
Ship waves and the stability of armour layers protecting slopes
9th International Harbour Congress
Antwerpen, Belgien, Juni 1989
Delft Hydraulics Publication No. 428 (von 1989)
- /Wagner 1996/* Wagner, H.
Konzeption zur Prognose von durch Wind erzeugten Wellen für kleinere Seegebiete
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, TU Dresden
Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 9, S. 91 ff.
Dresden 1996
- /Yosifov et al. 1986/* Yosifov, K.; Zlatev, Z.; Staneva, A.
Optimum characteristics equations for K-J ducted propeller design charts
Bulgarian Ship Hydrodynamics Centre, Selected Papers Volume 1, Book 1, Varna
1986, pp. 73-84
- /ZfB 1993/* N.N.
Antriebstechnik für Binnenschiffe
Binnenschiffahrt - ZfB
Heft 8/1993, S. 14-19
- /ZTV-W 210/* Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (Hrsg.)
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen - Wasserbau für Böschungs- und Sohlensicherung (Leistungsbereich 210)
Drucksachenstelle bei der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Mitte,
Eigenverlag, Hannover 1991

11 Nomenklatur

11.1 Abkürzungen

BF	Böschungsfuß
BinSchStrO	Binnenschiffahrtsstraßenordnung
BW	Betriebswasserstand
BWStr	Binnenwasserstraße(n)
DEK	Dortmund-Ems-Kanal
DWD	Deutscher Wetterdienst
ES	Europaschiff
Fkt.	Funktion von (...)
Gl(n).	Gleichung(en)
GMS	Großmotorgüterschiff
GW	Grundwasserstand
KA	Kanalachse
MW	Mittelwasser
MS	Motorschiff
RHK	Rhein-Herne-Kanal
R-Profil	Rechteckprofil
RWS	Ruhewasserspiegel
SV	Schubverband
T-Profil	Trapezprofil
WDK	Wesel-Datteln-Kanal
Wsp.	Wasserspiegel
1D	eindimensional
2SV/4SV	2er bzw. 4er Schubverband

11.2 Symbole

a	[m]	kleinste Abmessung eines Wasserbausteins
a	[-]	Exponent zur Beschreibung der Strahlausbreitungssituation
a	[-]	Porenwasserdruckparameter
a_p	[m]	Abstand der Propellerachsen eines Zweischaubers zueinander
A	[-]	Beiwert zur Beschreibung der Strahlausbreitungssituation
A	[m ²]	Fließquerschnitt, Gewässerquerschnitt, Kanalquerschnitt
A'	[m ²]	Querschnittsfläche zwischen Schiffsachse und Ufer
A_0	[m ²]	Querschnittsfläche an der engsten Einschnürung hinter dem Propeller
A_A	[m ²]	Anströmfläche vor dem Propeller

A_E	[m ²]	Eintrittsfläche in die Propellerebene
A_K	[m ²]	unmodifizierte Querschnittsfläche des Kanals
$A_{K,\text{äqui}}$	[m ²]	äquivalenter Kanalquerschnitt
A_M	[m ²]	eingetauchter Hauptspantquerschnitt des Schiffes
$A_{S,\text{äqui}}$	[m ²]	äquivalente Schiffsquerschnittsfläche
$A_{S,B}$	[m ²]	Schiffsquerschnittsfläche am Bug
$A_{S,\text{eff}}$	[m ²]	effektive eingetauchte Querschnittsfläche des Schiffes
$A_{S,\text{eff},B}$	[m ²]	effektive eingetauchte Schiffsquerschnittsfläche am Bug
$A_{S,\text{eff},D}$	[m ²]	fiktiv vergrößerter, effektiver eingetauchter Schiffsquerschnitt bei Fahrt mit Drift
$A_{S,\text{eff},H}$	[m ²]	effektive eingetauchte Schiffsquerschnittsfläche am Heck
$A_{S,H}$	[m ²]	Schiffsquerschnittsfläche am Heck
A_W	[-]	Wellenhöhenbeiwert abhängig von Schiffsform, Schiffsabmessungen, Abladetiefe und Wassertiefe
b	[1/m]	Porenwasserdruckparameter
b	[m]	mittlere Abmessung eines Wasserbausteins
b'	[m]	Fahrrinnenbreite
b^*	[1/m]	Porenwasserdruckparameter für $t_a = t_a^* = 5s$
b_E	[m]	Einflussbreite des Rückströmungsfeldes, äquivalente Kanalbreite bei Flachwasserfahrt
b_F	[m]	Fahrrinnenbreite
b_m	[m]	mittlere Wasserspiegelbreite im Bereich der Wasserspiegelanhebung/-absenkung
b_r	[m]	rechnerische Kanalbreite, rechnerische Gewässerbreite
$b_{r,\text{äqui}}$	[m]	rechnerische Breite des äquivalenten Kanalprofils [m]
b_S	[m]	Kanalsohlenbreite, Sohlenbreite
b_{WS}	[m]	Wasserspiegelbreite
$b_{WS,\text{äqui}}$	[m]	äquivalente Wasserspiegelbreite
B	[m]	Breite einer Leitwerksöffnung
B	[m]	Schiffsbreite
B^*	[-]	Belastungsbeiwert
B_1	[m]	Breite der Einzelfahrspur
B_{85}^*	[-]	Stabilitätsbeiwert auf geneigter Böschung
$B_{85,0}^*$	[-]	Stabilitätsbeiwert allgemein
B_B	[m]	Schiffsbreite am Bug
B'_B	[-]	Stabilitätsbeiwert
B_B^*	[-]	Beiwert für Auftrittshäufigkeit
\tilde{B}_B	[-]	Beiwert für Auftrittshäufigkeit
B_H	[m]	Schiffsbreite am Heck
B_m	[m]	mittlere Schiffsbreite zwischen Bug und Heck
B_S	[-]	Beiwert bei Strahlangriff auf ebener Sohle

$B_{S,B\delta}$	[-]	Beiwert bei Strahlangriff auf Uferböschung
BW_o	[m+NN]	oberer Betriebswasserstand
BW_u	[m+NN]	unterer Betriebswasserstand
c	[-]	Kalibrierungskonstante
c	[m]	größte Abmessung eines Wasserbausteins
c	[m/s]	Wellenfortschrittsgeschwindigkeit, Wellengeschwindigkeit
c'	[kN/m ²]	effektive Kohäsion des Bodens, wirksame Kohäsion
c_0	[m/s]	Stauwellengeschwindigkeit
c'_{AB}	[kN/m ²]	Kohäsion, Adhäsion zwischen Zugelement und Boden über dem abgesenkten Wasserspiegel
c'_D	[kN/m ²]	Kohäsion der Deckschicht
c_F	[-]	fahrdynamische Konstante
C	[-]	Konstante zur näherungsweisen Beschreibung der Absinkzeit
C	[-]	Beiwert (für induzierte Anfangsgeschwindigkeit ausgehend von der Maschinenleistung)
C_A	[-]	Konstante für den Wellenaufbau
$C_{B\delta}$	[-]	Faktor zur Berücksichtigung des Böschungseinflusses
C_H	[-]	Faktor für den Einfluss von Schiffstyp, Abladung und Vertrimmung
C_{Isb}	[-]	Faktor nach Isbash
C_m	[-]	Beiwert für die Belastungsdauer
d_0	[m]	Strahldurchmesser am Ort der maximalen Kontraktion
d_A	[m]	Strahldurchmesser im Anströmbereich
d_D	[m]	Dicke der Deckschicht (gemessen senkrecht zur Oberfläche)
$d_{D(A)}$	[m]	Einbaudicke der Ausgangsdeckschicht (A)
$d_{D(B)}$	[m]	Einbaudicke der alternativen hydraulisch gleichwertigen Deckschicht (B)
d_{DF}	[m]	Dicke der Steinschicht in der Fußvorlage
d_{Di}	[m]	Dicke der Dichtungsschicht
d_{Do}	[m]	Dicke der Deckschicht oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels
d_F	[m]	Dicke des Filters
d_{FF}	[m]	Dicke des Filters in der Fußvorlage
d_{Fkrit}	[m]	kritische Tiefe unter der Fußvorlage
d_{Fo}	[m]	Dicke eines mineralischen Filters oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels
d_{krit}	[m]	kritische Tiefe der Bruchfuge, Tiefe der kritischen Bruchfuge
d_{kritB}	[m]	kritische Tiefe der Bruchfuge zur Verhinderung von hydrodynamischen Bodenverlagerungen
d_x	[m]	Durchmesser des Propellerstrahlkegels
D	[m]	Korndurchmesser
D	[m]	Propellerdurchmesser
D_{10}	[m]	Korndurchmesser bei 10 % Siebdurchgang
D_{15}	[m]	Korndurchmesser bei 15 % Siebdurchgang

D_{50}	[m]	Korndurchmesser bei 50 % Siebdurchgang
$D_{50,TLW}$	[m]	erforderlicher mittlerer Korndurchmesser entsprechend /TLW/
D_{60}	[m]	Korndurchmesser bei 60 % Siebdurchgang
D_{85}	[m]	Korndurchmesser bei 85 % Siebdurchgang
D_{90}	[m]	Korndurchmesser bei 90 % Siebdurchgang
D_i	[m]	repräsentativer Korndurchmesser der Klasse i, entspricht dem geometrischen Mittel aus D_{i0} und D_{iu}
D_{i0}	[m]	Obergrenze der Korngrößenklasse i (Quadratlochweite des Siebes)
D_{iu}	[m]	Untergrenze der Korngrößenklasse i (Quadratlochweite des Siebes)
D_L	[m]	charakteristische größte Steinlänge (größte gemessene Länge eines Wasserbausteins)
D_n	[m]	nominale Steingröße
D_{n50}	[m]	erforderlicher mittlerer nominaler Steindurchmesser, nominale Steingröße
$D_{nSt(A)}$	[m]	nominale Steingröße der Ausgangsdeckschicht des Bemessungsfalles (A)
$D_{nSt(B)}$	[m]	gewählte nominale Steingröße der alternativen hydraulisch wirksamen Deckschicht (B)
D_{TLW}	[m]	Steindurchmesser nach TLW
D_x	[m]	Korndurchmesser bei x % Siebdurchgang
e	[-]	Eulersche Konstante $e \approx 2,718$
e'_{ph}	[kN/m ²]	horizontale Ordinate des passiven Erddrucks
erf τ	[kN/m ²]	erforderliche Schubspannung
erf τ_A	[kN/m ²]	erforderliche zusätzliche stützende Schubspannung
erf τ_F	[kN/m ²]	erforderliche Schubspannung bei einer Fußspundwand
E	[-]	Beiwert zur Charakterisierung von Heckform und Ruderanordnung
E'_a	[kN/m]	aktiver Erddruck im Boden unter der Böschungssicherung
E'_p	[kN/m]	passiver Erddruck, Erdwiderstand
E'_{ph}	[kN/m]	horizontaler Anteil des Erdwiderstands der Fußvorlage
E_S	[MN/m ²]	Steifemodul des Bodens
\tilde{f}	[-]	Formparameter
f_B	[-]	Faktor der Einflussbreite abhängig vom Schiffstyp
f_{cr}	[-]	Geschwindigkeitsbeiwert
f_N	[-]	Faktor zur gewählten Propellerdrehzahl
f_P	[-]	Faktor zur einsetzbaren Maschinenleistung
f_{red}	[-]	Reduktionsfaktor für Energieverluste beim Wellenauflauf
f_λ	[-]	Wellenlängenbeiwert
F	[kN/m]	Fußstützkraft, Kraft aus Deckwerk
F_{eff}	[m]	effektiver Fetch
Fr	[-]	Froude-Zahl im Heckbereich
\tilde{Fr}	[-]	Froude-Zahl am Ort der maximalen Heckwellenhöhe
Fr_h	[-]	Froudesche Tiefenzahl

g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
g'	[kN/m ²]	Kraftwirkung des Flächengewichts der Deckschicht, erforderliches Flächengewicht der Deckschicht
g'	[m/s ²]	relative Dichte
G	[kN]	Steingewicht
G'	[kg/m ³]	Gewichtskraft des Bodenkörpers unter Auftrieb
G_i	[kN]	repräsentatives Steingewicht der Klasse i , entspricht dem geometrischen Mittel aus G_{i0} und G_{iu}
G_{i0}	[kN]	Obergrenze des Steingewichts der Klasse i
G_{iu}	[kN]	Untergrenze des Steingewichts der Klasse i
G_{50}	[kg]	erforderliches mittleres Steingewicht
h	[m]	Wassertiefe, Kanalwassertiefe
h'	[m]	Fahrrinntiefe
h_b	[m]	Wassertiefe im Brechpunkt
h_{Kolk}	[m]	Kolkttiefe unter der Gewässersohle
h_m	[m]	mittlere Wassertiefe
h_p	[m]	Höhenlage der Propellerachse über der Sohle
h_W	[m]	Wassertiefe bei Ruhewasserspiegel, Wassertiefe im Ruhezustand
h_x	[m]	Wassertiefe im engsten Fließquerschnitt
H	[m]	Wellenhöhe, Schiffswellenhöhe, Bemessungswellenhöhe
H_b	[m]	Wellenhöhe im Brechpunkt
H_{Bem}	[m]	Bemessungswellenhöhe
H_{diff}	[m]	Wellenhöhe infolge Diffraktion
H_{ein}	[m]	Höhe der einfallenden Welle
H_{refl}	[m]	Wellenhöhe infolge Reflexion
H_s	[m]	signifikante Wellenhöhe, Bemessungswellenhöhe für Windwellen
H_{Sek}	[m]	Sekundärwellenhöhe, Höhe der zusätzlichen Sekundärwelle
$H_{\text{Sek,gl}}$	[m]	Sekundärwellenhöhe bei Fahrt mit Gleitgeschwindigkeit
$H_{\text{Sek,q}}$	[m]	Höhe der reinen Sekundärheckquerwelle
H_{sh}	[m]	Wellenhöhe infolge Wellenaufsteilen (wave shoaling)
H_{tol}	[m]	tolerierte Wellenhöhe
$H_{u,\text{Bug}}$	[m]	Maximalwert der Bugwellenhöhe am Ufer bei exzentrischer Fahrt
$H_{u,H}^*$	[m]	maßgebende Wellenhöhe im Uferbereich am Heck zur Berechnung der Absinkzeit
$H_{u,\text{Heck}}$	[m]	Maximalwert der Heckwellenhöhe am Ufer bei exzentrischer Fahrt
i_p	[kN/m ³]	Strömungsdruck
J	[-]	Propellerfortschrittsgrad
k	[-]	reziprokes Querschnittsverhältniss, blockage coefficient

k	[m/s]	Durchlässigkeit des Bodens, Wasserdurchlässigkeit des Bodens
K	[-]	Neigungsbeiwert
K'	[-]	Diffraaktionskoeffizient
K_l	[-]	Längsneigungsbeiwert
K_q	[-]	Querneigungsbeiwert
K_{refl}	[-]	Reflexionskoeffizient
K_{sh}	[-]	Aufsteilungskoeffizient, Shoaling-Koeffizient
K_{SS}	[m]	äquivalente Sandrauheit der Schiffshaut
K_T	[-]	Schubbeiwert des Propellers für $J = 0$
$K_{T,DP}$	[-]	Schubbeiwert eines Propellers mit Düse für $J = 0$
$K_{T,DPJ}$	[m]	Schubbeiwert eines Propellers mit Düse für $J \neq 0$
K_{TJ}	[-]	Schubbeiwert eines Propellers ohne Düse für $J \neq 0$
l_u	[m]	benetzter Umfang
L	[m]	Schiffslänge, Länge des Sportbootes
L	[m]	Wandabstand der Propellerebene
L	[m]	Wellenlänge
L_{eff}	[m]	effektive Schiffslänge
L_{ein}	[m]	Länge der einfallenden Welle
L_{Fu}	[m]	Länge der Fußvorlage
L_H	[m]	Wellenlänge der brechenden Heckquerwelle
L_o	[m]	Länge der Böschungssicherung über dem abgesenkten Wasserspiegel
L_{pris}	[m]	Länge des Fahrzeugbereiches mit weitgehend prismatischem Querschnitt
L_{Sek}	[m]	Sekundärwellenlänge
L_{sh}	[m]	Wellenlänge infolge von Wellenaufsteilen (engl.: wave shoaling)
L_u	[m]	Länge der Böschungssicherung unterhalb des abgesenkten Wasserspiegels, Unterwasserlänge der Böschungssicherung
L_W	[m]	wellenbildende Schiffslänge
m	[-]	Böschungsneigung (Achtung: anders definiert als die Steigung einer Geraden)
$m_{K,äqui}$	[-]	äquivalente Böschungsneigung
m_{lks}	[-]	Böschungsneigung am linken Ufer
m_{rts}	[-]	Böschungsneigung am rechten Ufer
m_v	[l/m ²]	Vergussmenge
$\max L_{Fu}$	[m]	maximal zulässige Länge der Fußvorlage
$\max v_{za}$	[m/s]	maximale Absunkgeschwindigkeit
$\max \tau_{F1}$	[kN/m ²]	maximal erreichbare äquivalente Schubspannung für Bruchmechanismus 1
$\max \tau_{F2}$	[kN/m ²]	maximal übertragbare äquivalente Schubspannung bei einer Fußvorlage
$\min d_D$	[m]	mindestens erforderliche Einbaudicke, Mindestdicke der Deckschicht
$\min L_{Fu}$	[m]	minimal mögliche Länge der Fußvorlage

n	[-]	Hohlraumanteil, Porenanteil des Mineralkornfilters bzw. des (unvergossenen) Deckwerks
n	[1/min]	Propellerdrehzahl, Schraubendrehzahl des Bugstrahlruders
n	[-]	Querschnittsverhältnis
$n_{\text{äqui}}$	[-]	äquivalentes Querschnittsverhältnis
n_{Nenn}	[1/min]	Nenn Drehzahl des Propellers
p	[bar; Pa]	Druck
P	[m]	Konstruktionssteigung
P_{Bug}	[kW]	installierte Leistung des Bugstrahlruders
$P_{\text{d,Nenn}}$	[kW]	Nennleistung
r_x	[m]	radialer Abstand des Auftreffpunktes von der Strahlachse in der Entfernung x von der Propellerebene
R	[m]	innerer, kleinerer Radius einer gekrümmten Fahrspur
R'_d	[m]	vertikale Erstreckung des Deckwerks unter dem Ruhewasserspiegel
$R(\alpha)$	[m]	Einflusslänge zum gegenüberliegenden Ufer beim Winkel α
S	[-]	Sättigungsgrad des Bodens
S	[km]	maximale Streichlänge
S_m	[km]	mittlere Streichlänge
SF	[-]	Formfaktor für Wasserbausteine
t	[s]	Zeit
t	[m]	Tiefe unter der Gewässersohle
t_a	[s]	Absenkzeit allgemein
t_a^*	[s]	Absenkzeit $t_a = t_a^* = 5 \text{ s}$
$t_{a,B}$	[s]	Absenkzeit am Bug
$t_{a,B,\text{Sek}}$	[s]	Absenkzeit der Sekundärwelle vom Bug
$t_{a,H}$	[s]	Absenkzeit am Heck
$t_{a,W}$	[s]	Absenkzeit einer Welle
t_f	[m]	Kielfreiheit
t_F	[m]	Tiefe der Fußeinbindung / Tiefe der Fußspundwand / Tiefe der gesamten Fußvorlage
t_{fl}	[m]	Flottwasser
$t_{fl,\text{min}}$	[m]	Mindestflottwasser
t_k	[m]	Kolkentiefe vor dem Fuß des Deckwerks an der Gewässersohle, Kolkentiefe
t_{krit}	[m]	kritische Tiefe unter der Gewässersohle
t_{min}	[h]	Mindest-Windwirkdauer
t_v	[m]	Tauchtiefe
T	[s]	mittlere Wellenperiode, Wellenperiode, charakteristische Wellenperiode
T	[m]	Tiefgang, Tauchtiefe am Hauptspant
T_a	[s]	Absenkdauer

T_B	[m]	Schiffstiefgang im Bugbereich
T_{ein}	[s]	Periode der einfallenden Welle
T_H	[m]	Schiffstiefgang im Heckbereich
T_m	[m]	mittlerer Schiffstiefgang zwischen Bug und Heck
u	[m]	Uferabstand (Mitte Schiff-Uferlinie bei RWS)
u	[m/s]	Windgeschwindigkeit
u'	[m]	Abstand Schiffswand - Uferlinie
u^*	[m]	Uferabstand beim Auftreffen der ersten Interferenzwellengruppe auf das Ufer
u_b	[kN/m ²]	resultierender Wasserüberdruck
U_b	[kN/m]	Resultierende des Porenwasserüberdrucks
u_{eff}	[m]	effektiver Uferabstand
u_{max}	[m/s]	maximale Geschwindigkeit der Wiederauffüllungsströmung in Höhe der Deckwerkssteine
$u_{\text{max,B}}$	[m/s]	Bemessungsgeschwindigkeit in der Wiederauffüllungsströmung
u_r	[m]	rechnerischer Uferabstand, Abstand zum rechnerischen Ufer
$u_{r,\text{lhs}}$	[m]	Abstand zum linken Ufer im rechnerischen Kanalprofil
$u_{r,\text{max}}$	[m]	maximaler Uferabstand im rechnerischen Profil
$u_{r,\text{min}}$	[m]	minimaler Uferabstand im rechnerischen Profil
$u_{r,\text{rhs}}$	[m]	Abstand zum rechten Ufer im rechnerischen Kanalprofil
U	[-]	Ungleichförmigkeitszahl der Steinschüttung
v	[m/s]	Geschwindigkeit allgemein
v_0	[m/s]	induzierte Anfangsgeschwindigkeit bei $J = 0$
v_{0J}	[m/s]	induzierte Anfangsgeschwindigkeit bei $J > 0$
v_A	[m/s]	Anströmgeschwindigkeit des Propellers
$v_{B\text{max}}$	[m/s]	maximale Sohlgeschwindigkeit im Auftreffpunkt des Propellerstrahls für $J = 0$
$v_{B\text{max}1}$	[m/s]	maximale Sohlgeschwindigkeit im Auftreffpunkt des Propellerstrahls für $J \neq 0$
v_{krit}	[m/s]	kritische Schiffsgeschwindigkeit
v_{max}	[m/s]	maximale Strömungsgeschwindigkeit aus Rückströmung und Fließgeschwindigkeit
$v_{\text{max,S}}$	[m/s]	maximale Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle
$v_{\text{max,S,K}}$	[m/s]	maximale Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle am Fuß der Kaimauer
$v_{\text{max,S,xK}}$	[m/s]	veränderte maximale Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle nach Umlenkung im Abstand x_K von der Kaimauer
v_P	[m/s]	Geschwindigkeit in der Propellerebene
$\bar{v}_{\text{rück}}$	[m/s]	mittlere Rückströmungsgeschwindigkeit, in Längs- und Querrichtung gemittelte Rückströmungsgeschwindigkeit
$\bar{v}_{\text{rück,u}}$	[m/s]	mittlere Rückströmungsgeschwindigkeit im Uferbereich, in Längsrichtung am Ufer gemittelte Rückströmungsgeschwindigkeit
$\bar{v}_{\text{rück,u,lhs}}$	[m/s]	in Längsrichtung am linken Ufer gemittelte Rückströmungsgeschwindigkeit
$\bar{v}_{\text{rück,u,rhs}}$	[m/s]	in Längsrichtung am rechten Ufer gemittelte Rückströmungsgeschwindigkeit

$\hat{V}_{\text{rück}}$	[m/s]	maximale Rückströmungsgeschwindigkeit
$\hat{V}_{\text{rück,u,Bug}}$	[m/s]	maximale Rückströmungsgeschwindigkeit am Bug im Uferbereich
$\hat{V}_{\text{rück,u,Heck}}$	[m/s]	maximale Rückströmungsgeschwindigkeit am Heck im Uferbereich
V_S	[m/s]	Schiffsgeschwindigkeit, Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser
$V_{S,gl}$	[m/s]	Gleitgeschwindigkeit
$V_{S,zul}$	[m/s]	zulässige Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser
V_{Str}	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit
$V_{SüG}$	[m/s]	Schiffsgeschwindigkeit über Grund
V_{xmax}	[m/s]	Zentralgeschwindigkeit
V_{xr}	[m/s]	Strahlgeschwindigkeit relativ zum Schiff im Abstand des Radius r_x von der Strahlachse (Auftreffpunkt) für $J = 0$
V_{xr1}	[m/s]	Strahlgeschwindigkeit relativ zum Schiff im Abstand des Radius r_x von der Strahlachse (Auftreffpunkt) für $J \neq 0$
V_{za}	[m/s]	Absunkgeschwindigkeit des Wasserspiegels
\bar{V}_{za}	[m/s]	mittlere Absunkgeschwindigkeit
$\bar{V}_{za,B}$	[m/s]	durchschnittliche Absunkgeschwindigkeit am Bug (Durchschnitt aus Schiffsbeobachtungen)
$\bar{V}_{za,Bug}$	[m/s]	mittlere Absunkgeschwindigkeit am Bug (gemittelt über Absunkverlauf)
$\bar{V}_{za,Heck}$	[m/s]	mittlere Absunkgeschwindigkeit am Heck (gemittelt über Absunkverlauf)
V_{zul}	[m/s]	zugelassene Geschwindigkeit nach BinSchStrO
w	[-]	Nachstromziffer
x	[m]	Koordinate
x	[m]	Entfernung von der Propellerebene in Strahlachse
x	[m]	Zuschlag für verschiedene Steinmaterialien
x_{gr}	[m]	Entfernung, ab der die Strahlausbreitung behindert wird
x_K	[m]	Abstand des umgelenkten Strahls auf der Sohle ab Kaimauer
x_S	[m]	Entfernung vom Drehpunkt der Propellerebene auf der Sohle
$x_{S,max}$	[m]	Lage der maximalen Sohlgeschwindigkeit hinter dem Drehpunkt der Propellerebene
y	[m]	Koordinate
y	[m]	Abstand des gefahrenen Kursweges von der Kanalachse, Abstand der Kurswegachse von der Kanalachse
$y_{äqui}$	[m]	Exzentrizität des Schiffspfades im äquivalenten Kanalprofil
z	[-]	Flügelzahl eines Propellers
z	[m]	Tiefe
z	[m]	Tiefe unterhalb der Böschungsoberfläche bzw. unterhalb der Gewässersohle, normal zum Gewässerbett

z_a	[m]	maximaler schneller Wasserspiegelabsenk, Absenk
z_{AL}	[m]	(Wellen-) Auflaufhöhe
$z_{AL,0}$	[m]	(Wellen-) Auflaufhöhe für $f_{red} = 1$
$z_{AL,St}$	[m]	Wellenaufbauhöhe auf Steinschüttungen
z_h	[m]	Tiefe, bei der der Porenwasserüberdruck auf die Hälfte seines maximalen Werts ansteigt
Z	[kN/m]	Zugkraft in einer Deckwerksaufhängung
α	[°]	äußerer Strahlbegrenzungswinkel
α	[°]	Winkel der Einflussrichtung
α	[°]	Winkel zwischen Windrichtung und Böschungsliniennormaler
α_1	[-]	Korrekturbeiwert zur Beschreibung der Nähe zur kritischen Schiffsgeschwindigkeit
α_0	[°]	Winkel zwischen Propellerachse und Strahlachse
α_B	[°]	durchschnittlicher Ablenkungswinkel
α_K	[°]	Kelvinscher Winkel ($\alpha_K \approx 19^\circ$)
α_l	[°]	Längsneigungswinkel
α_q	[°]	Querneigungswinkel
α_z	[°]	äußerer Strahlbegrenzungswinkel vertikal
β	[°]	Böschungswinkel, Böschungswinkel oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels
β_D	[°]	Driftwinkel
β_K	[°]	Winkel zwischen Kamm der Sekundärschrägwellen und Uferlinie (meist: $\beta_K = 54,74^\circ$)
β_{St}	[°]	Winkel zwischen Strahlachse und Böschungsnormaler (Angriffswinkel)
β_W	[°]	Anlaufwinkel zwischen Wellenkammorthogonaler und Böschungsfälllinie, Winkel zwischen Wellenkamm der Sekundärschrägwellen und Uferlinie
β_λ	[-]	Beiwert zur wellenbildenden Schiffslänge
γ	[kN/m ³]	Wichte des Bodens
γ'	[kN/m ³]	Wichte des Bodens unter Auftrieb
γ_A	[-]	Sicherheit gegen Auftrieb
γ_B	[-]	Völligkeitsgrad des Schiffsquerschnitts im Bugbereich
γ_c	[-]	Teilsicherheitsbeiwert für die Kohäsion
γ'_D	[kN/m ³]	Wichte der Deckschicht unter Auftrieb
γ'_{DF}	[kN/m ³]	Wichte der Deckschicht in der Fußvorlage unter Auftrieb
γ'_{Di}	[kN/m ³]	Wichte des Dichtungsmaterials unter Auftrieb
γ_{Do}	[kN/m ³]	Wichte der Deckschicht oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels
γ_F	[kN/m ³]	Wichte des Filters
γ'_F	[kN/m ³]	Wichte des (Korn-) Filters unter Auftrieb
γ'_{FF}	[kN/m ³]	Wichte des Filters in der Fußvorlage unter Auftrieb
γ_{Fo}	[kN/m ³]	Wichte eines mineralischen Filters oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels
γ_H	[-]	Völligkeitsgrad des Schiffsquerschnitts im Heckbereich

γ_s	[kN/m ³]	Wichte des Schüttmaterials
γ_v	[kN/m ³]	Wichte des Vergussstoffs
γ_w	[kN/m ³]	Wichte des Wassers
γ_φ	[-]	Teilsicherheitsbeiwert für den Reibungswinkel
δ	[°]	Trimmwinkel
δ_a	[°]	Wandreibungswinkel (aktive Seite)
δ_p	[°]	Wandreibungswinkel (passive Seite)
δ_{1H}	[m]	Verdrängungsdicke im Heckbereich
ΔA	[m ²]	Querschnittsreduzierung im Kanal infolge Schiffsquerschnitt und Absenk
ΔG_i	[kN]	Gewicht aller Einzelsteine einer Korngrößenklasse i
Δh	[m]	Wasserspiegelanhebung / -absenkung (je nach Index)
$\Delta \bar{h}$	[m]	über die Kanalbreite gemittelte maximale Wasserspiegelabsenkung im engsten Durchflussquerschnitt, mittlerer Wasserspiegelabsenkung nach 1D-Kanaltheorie, in Längs- und Querrichtung gemittelte Wasserspiegelabsenkung
$\Delta \hat{h}$	[m]	maximaler Wasserspiegelabsenkung im Uferbereich
Δh_B	[m]	Wasserspiegelanspannung vor dem Bug
$\Delta \hat{h}_{\text{Heck}}$	[m]	Heckabsenkung
$\Delta \bar{h}_{\text{krit}}$	[m]	mittlerer Wasserspiegelabsenkung bei kritischer Schiffsgeschwindigkeit
$\Delta H_{s, oWl}$	[m]	Wellenhöhenanteil oberhalb der Wasserlinie
Δh_{Sek}	[m]	maximale Wasserspiegelhebung des Sekundärwellensystems
$\Delta \bar{h}_u$	[m]	in Längsrichtung am Ufer gemittelte Wasserspiegelabsenkung
$\Delta \bar{h}_{u, \text{Bug}}$	[m]	gemittelter Wasserspiegelabsenkung am Ufer im Bugbereich bei mittiger Fahrt
$\Delta \hat{h}_{u, \text{Bug}}$	[m]	maximaler Wasserspiegelabsenkung im Uferbereich am Bug ohne Exzentrizitätseinfluss
$\Delta \bar{h}_{u, \text{lks}}$	[m]	in Längsrichtung am linken Ufer gemittelte Wasserspiegelabsenkung
$\Delta \bar{h}_{u, \text{Heck}}$	[m]	gemittelter Wasserspiegelabsenkung am Ufer im Heckbereich bei mittiger Fahrt
$\Delta \hat{h}_{u, \text{Heck}}$	[m]	maximaler Wasserspiegelabsenkung im Uferbereich am Heck ohne Exzentrizitätseinfluss
$\Delta \bar{h}_{u, \text{rts}}$	[m]	in Längsrichtung am rechten Ufer gemittelte Wasserspiegelabsenkung
Δh_w	[m]	Höhenunterschied zwischen Grundwasser- und Ruhewasserspiegel in der Wasserstraße, temporärer Wasserspiegelanstieg
Δh_w	[m]	Windstauhöhe am windabgewandten Ende des Windwirkgebietes
$\Delta h_{wA, B}$	[m]	Wasserspiegelanspannung vor dem Bug
Δp	[bar; Pa]	Druckdifferenz
ΔQ	[m ³ /s]	plötzliche Abflussänderung
Δt	[m]	dynamische Einsinktiefen (Squat)
Δt_k	[m]	Höhenunterschied zwischen Filterunterseite und Sohle des Kolks

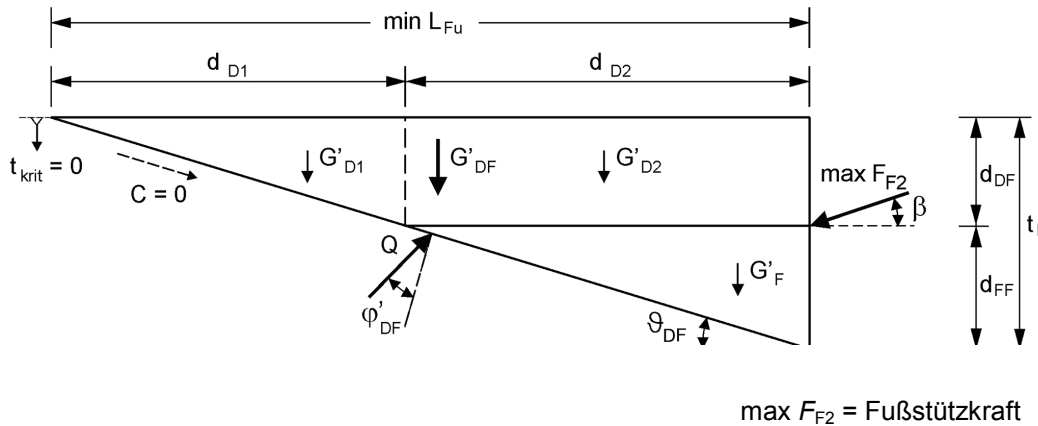
Δu	[kN/m ²]	Porenwasserüberdruck
$\Delta \alpha$	[°]	Schrittweite beim Sektorenverfahren zur Fetchbestimmung
ϑ_p	[°]	Gleitflächenwinkel
ϑ_{DF}	[°]	Gleitflächenwinkel des passiven Erddruckkeils innerhalb der Fußvorlage
λ_q	[m]	Wellenlänge der Querwelle
λ_s	[m]	Wellenlänge der Schrägwelle
ξ	[-]	Brecherkennzahl
ρ	[kg/m ³]	Dichte des Bodens
ρ_A	[kg/m ³]	Trockenrohdichte des Einzelsteines des Bemessungsfalles A
ρ'_A	[kg/m ³]	Auftriebsdichte des Einzelsteines des Bemessungsfalles A
ρ_B	[kg/m ³]	Trockenrohdichte des Einzelsteines der alternativen hydraulisch gleichwertigen Deckschicht B
ρ'_B	[kg/m ³]	Auftriebsdichte des Einzelsteines der alternativen hydraulisch gleichwertigen Deckschicht B
ρ_s	[kg/m ³]	Dichte des Schüttsteinmaterials, Dichte der Wasserbausteine
ρ_w	[kg/m ³]	Dichte des Wassers
σ'_v	[kN/m ²]	effektive Vertikalspannung
τ_A	[kN/m ²]	Zusatzspannung aus einer Aufhängung der Deckschicht
τ_F	[kN/m ²]	Zusatzspannung aus einer Fußstützung
φ'	[°]	effektiver Reibungswinkel des Bodens
φ'_{AB}	[°]	wirksamer Reibungswinkel zwischen Zugelement und Boden oder Zugelement und Deckschicht über dem abgesenkten Wasserspiegel; der kleinere Wert ist maßgebend
φ'_D	[°]	innerer Reibungswinkel der Steinschüttung bzw. des Deckschichtmaterials
φ'_{DF}	[°]	Wichte der Deckschicht in der Fußvorlage unter Auftrieb
φ'_F	[°]	innerer Reibungswinkel des Kornfilters

Anhang A:

Herleitung der Formeln für die geotechnischen Nachweise mit Fußstützung

zu 7.2.5.3 Bruchmechanismus 2 mit Fußvorlage

Skizze zur Ermittlung von $\max F_{F2}$ (Nachweis innerhalb):



(1) $\sum V = 0: \quad Q \cos(\varphi'_{DF} + \vartheta_{DF}) - G'_{DF} - \max F_{F2} \sin \beta = 0$

(2) $\sum H = 0: \quad -Q \sin(\varphi'_{DF} + \vartheta_{DF}) + \max F_{F2} \cos \beta = 0$

aus (2) $\Rightarrow \quad Q = \frac{\max F_{F2} \cos \beta}{\sin(\varphi'_{DF} + \vartheta_{DF})}$

eingesetzt in (1)

mit

(3) $\vartheta_{DF} = 45^\circ - \frac{\varphi'_{DF}}{2}$

folgt für $\max F_{F2}$:

(4) $\max F_{F2} = \frac{G'}{\cos \beta \cot(\varphi'_{DF} + \vartheta_{DF}) - \sin \beta}$

mit

(5) $G' = \frac{d_{DF}^2 \gamma'_{DF}}{2 \tan \vartheta_{DF}} + \frac{d_{FF}^2 \gamma'_{FF}}{2 \tan \vartheta_{DF}} + \frac{d_{DF} d_{FF} \gamma'_{DF}}{\tan \vartheta_{DF}}$

Hieraus ergibt sich für den inneren Erddruckkeil der Fußvorlage mit

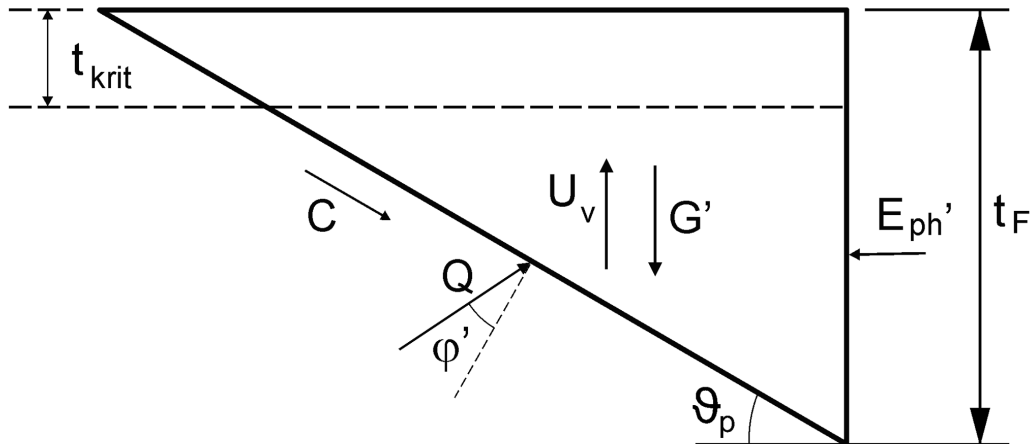
(6) $\max \tau_{F2,i} = \frac{\max F_{F2}}{L_u}$

(mit L_u = Länge der Unterwasserböschung)

die maximale äquivalente Schubspannung, wie sie aus Gleichung (7-10) (Nachweis innerhalb) errechnet werden kann.

Zur Ermittlung der maximal aufnehmbaren äquivalenten Schubspannung $\max \tau_{F2,a}$ darf entsprechend Gleichung (7-11) (Nachweis außerhalb) auch der vor der Fußvorlage wirkende passive Erddruck E'_{ph} berücksichtigt werden.

Skizze zur Ermittlung des passiven Erddrucks vor der Fußvorlage:



$$(7) \sum V = 0: \quad -C \sin \vartheta_p + Q \cos(\varphi' + \vartheta_p) + U_v - G' = 0$$

$$(8) \sum H = 0: \quad -C \cos \vartheta_p - Q' \sin(\varphi' + \vartheta_p) + E'_{ph} = 0$$

$$\text{aus (7)} \Rightarrow \quad Q' = \frac{G' - U_v + C \sin \vartheta_p}{\cos(\varphi' + \vartheta_p)}$$

eingesetzt in (8)

bestimmt sich der passive Erddruck E'_{ph} vor der Fußvorlage zu

$$E'_{ph} = (G' - U_v + C \sin \vartheta_p) \tan(\varphi' + \vartheta_p) + C \cos \vartheta_p \quad (7-15)$$

mit den Hilfsfunktionen

$$\vartheta_p = 45^\circ - \frac{\varphi'}{2}$$

und

$$G' = \frac{(t_F - t_{krit})^2 \gamma'}{2 \tan \vartheta_p}$$

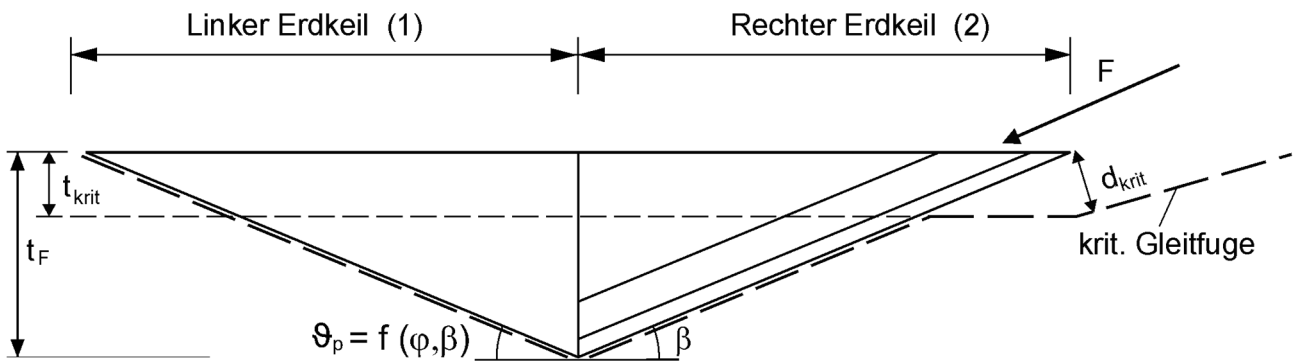
und

$$C = \frac{c' (t_F - t_{krit})}{\sin \vartheta_p}$$

sowie

$$U_v = \frac{\gamma_w z_a}{\tan \vartheta_p} \left[\frac{e^{-b t_F} - e^{-b t_{krit}}}{b} + e^{-b t_{krit}} (t_F - t_{krit}) \right]$$

zu 7.2.5.4 Bruchmechanismus 2 bei einer Fußeinbindung

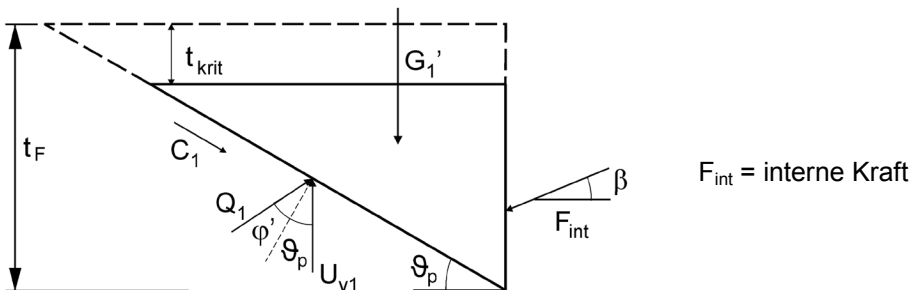


$$L_u = \frac{h_W - z_a + t_k + t_{krit}}{\sin \beta}$$

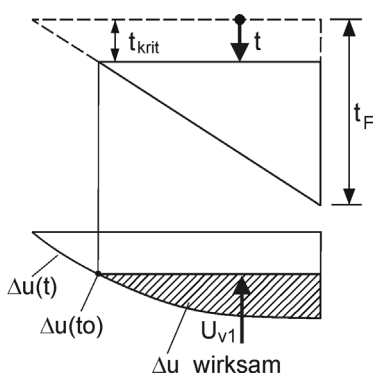
$$\vartheta_p = \arctan \left[\sqrt{\frac{(1 + \tan^2 \varphi') \tan \varphi'}{\tan \varphi' + \tan \beta}} - \tan \varphi' \right]$$

kritische Tiefe = Fluidisierungstiefe: $t_{krit} = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{b \gamma_W z_a}{\gamma'} \right)$ (7-17)

Linker Erdkeil



Vertikaler Porenwasserüberdruck U_{v1}



$$U_{v1} = \int \Delta u(x) dx - \Delta u(t_{krit}) \frac{t_F - t_{krit}}{\tan \vartheta_p}$$

mit $dx = \frac{dt}{\tan \vartheta_p}$ und $\Delta u(t) = \gamma_W z_a (1 - e^{-bt})$

$$U_{v1} = \frac{\gamma_W z_a}{\tan \vartheta_p} \cdot \int_{t_{krit}}^{t_F} (1 - e^{-bt}) dt - \frac{\gamma_W z_a}{\tan \vartheta_p} (1 - e^{-bt_{krit}}) (t_F - t_{krit})$$

$$= \frac{\gamma_W z_a}{\tan \vartheta_p} \left[t_F + \frac{1}{b} e^{-bt_F} - t_0 - \frac{1}{b} e^{-bt_{krit}} - t_F + t_F e^{-bt_{krit}} + t_0 - t_0 e^{-bt_{krit}} \right]$$

$$U_{v1} = \frac{\gamma_W z_a}{\tan \vartheta_p} \left[\frac{e^{-bt_F} - e^{-bt_{krit}}}{b} + e^{-bt_{krit}} (t_F - t_{krit}) \right] \quad (s.7-18)$$

$$(1) \quad \Sigma V = 0: \quad -C'_1 \sin \vartheta_p + Q_1 \cos(\varphi' + \vartheta_p) + U_{v1} - G'_1 - F_{\text{int}} \sin \beta = 0$$

$$(2) \quad \Sigma H = 0: \quad -C'_1 \cos \vartheta_p - Q_1 \sin(\varphi' + \vartheta_p) + F_{\text{int}} \cos \beta = 0$$

$$\text{aus (2)} \Rightarrow (2') \quad Q_1 = \frac{F_{\text{int}} \cos \beta - C'_1 \cos \vartheta_p}{\tan(\varphi' + \vartheta_p)}$$

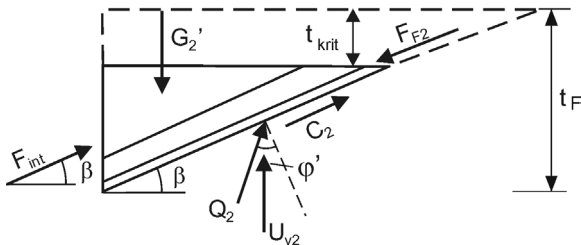
$$(2') \text{ in (1):} \quad -C'_1 \sin \vartheta_p + \frac{F_{\text{int}} \cos \beta - C'_1 \cos \vartheta_p}{\tan(\varphi' + \vartheta_p)} + U_{v1} - G'_1 - F_{\text{int}} \sin \beta = 0$$

$$F_{\text{int}} \left(\frac{\cos \beta}{\tan(\varphi' + \vartheta_p)} - \sin \beta \right) = C'_1 \sin \vartheta_p + G'_1 - U_{v1} + C'_1 \frac{\cos \vartheta_p}{\tan(\varphi' + \vartheta_p)}$$

$$(3) \quad F_{\text{int}} = \frac{-U_{v1} + G'_1 + C'_1 \left(\sin \vartheta_p + \frac{\cos \vartheta_p}{\tan(\varphi' + \vartheta_p)} \right)}{-\sin \beta + \frac{\cos \beta}{\tan(\varphi' + \vartheta_p)}}$$

$$\text{mit: } G'_1 = \frac{1}{2} (t_F - t_{\text{krit}})^2 \gamma' \quad \text{und} \quad C'_1 = \frac{c'(t_F - t_{\text{krit}})}{\sin \vartheta_p}$$

Rechter Erdkeil



Vertikaler Porenwasserüberdruck U_{v2}

$$U_{v2} = \frac{\gamma_w z_a}{\tan \beta} \left[\frac{e^{-bt_F} - e^{-bt_{\text{krit}}}}{b} + e^{-bt_{\text{krit}}} (t_F - t_{\text{krit}}) \right]$$

$$(4) \quad \Sigma V = 0: \quad G'_2 - U_{v2} - Q_2 \cos(\varphi' - \beta) - C_2 \sin \beta - F_{\text{int}} \sin \beta + F_{F2} \sin \beta = 0$$

$$(5) \quad \Sigma H = 0: \quad F_{\text{int}} \cos \beta + Q_2 \sin(\varphi' - \beta) + C_2 \cos \beta - F_{F2} \cos \beta = 0$$

$$\Rightarrow (5b) \quad Q_2 = \frac{(F_{F2} - F_{\text{int}} - C_2) \cos \beta}{\sin(\varphi' - \beta)}$$

$$(5b) \text{ in (4): } G'_2 - U_{v2} - (F_{F2} - F_{\text{int}} - C'_2) \cos \beta \cot(\varphi' - \beta) - C'_2 \sin \beta - F_{\text{int}} \sin \beta + F_{F2} \sin \beta = 0$$

$$\begin{aligned} F_{F2} (-\cos \beta \cot(\varphi' - \beta) + \sin \beta) &= U_{v2} + C'_2 \sin \beta + F_{\text{int}} (\sin \beta - \cos \beta \cot(\varphi' - \beta)) - G'_2 + \\ &\quad - C'_2 \cos \beta \cot(\varphi' - \beta) \\ &= U_{v2} - G'_2 + (C'_2 + F_{\text{int}}) (\sin \beta - \cos \beta \cot(\varphi' - \beta)) \end{aligned}$$

$$F_{F2} = \frac{U_{v2} + G'_2}{\sin \beta - \cos \beta \cot(\varphi' - \beta)} + C'_2 + F_{\text{int}}$$

$$\text{mit } G'_2 = \frac{1}{2} (t_F - t_{\text{krit}})^2 \gamma' \quad \text{und} \quad C'_2 = \frac{c'(t_F - t_{\text{krit}})}{\sin \beta}$$

$$\begin{aligned} \text{mit (3): } F_{F2} &= \frac{U_{v1} - G'_1 - C'_1 (\sin \vartheta_p + \cos \vartheta_p \cot(\varphi' + \vartheta_p))}{\sin \beta - \cos \beta \cot(\varphi' + \vartheta_p)} + \frac{U_{v2} - G'_2}{\sin \beta - \cos \beta \cot(\varphi' - \beta)} + C'_2 \\ &= \frac{U_{v1} - G'_1 - C'_1 A}{B} + \frac{U_{v2} - G'_2}{D} + C'_2 \end{aligned}$$

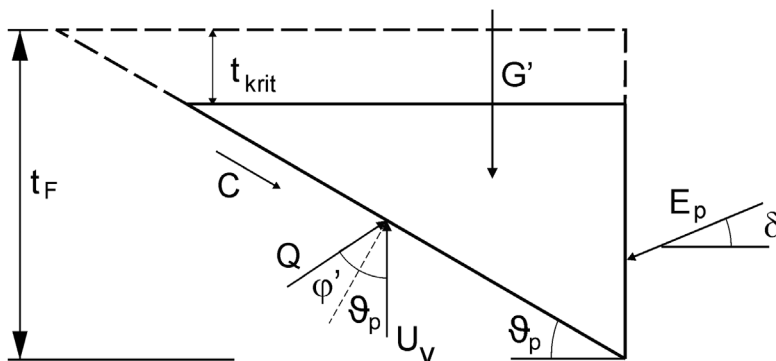
$$\text{mit } A = \sin \vartheta_p + \cos \vartheta_p \cot(\varphi' + \vartheta_p)$$

$$B = \sin \beta - \cos \beta \cot(\varphi' + \vartheta_p)$$

$$D = \sin \beta - \cos \beta \cot(\varphi' - \beta)$$

zu 7.2.5.5 Fußspundwand

Ermittlung von e_{ph} für Fußspundwand



$$\vartheta_p = \arctan \left[\sqrt{\frac{1 + \tan^2 \varphi' \tan \varphi'}{\tan \varphi' + \tan \delta}} - \tan \varphi' \right]$$

$$\text{kritische Tiefe = Fluidisierungstiefe: } t_{\text{krit}} = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{\gamma_w z_a b}{\gamma'} \right)$$

$$U_v = \frac{\gamma_w z_a}{\tan \vartheta_p} \left[\frac{e^{-bt_F} - e^{-bt_{\text{krit}}}}{b} + e^{-bt_{\text{krit}}} (t_F - t_{\text{krit}}) \right]$$

$$(1) \quad \Sigma V = 0: \quad G' - U_v - Q \cos(\vartheta_p + \varphi') + C \sin \vartheta_p + E_p \sin \delta = 0$$

$$(2) \quad \Sigma H = 0: \quad C \cos \vartheta_p + Q \sin(\vartheta_p + \varphi') - E_p \cos \delta = 0$$

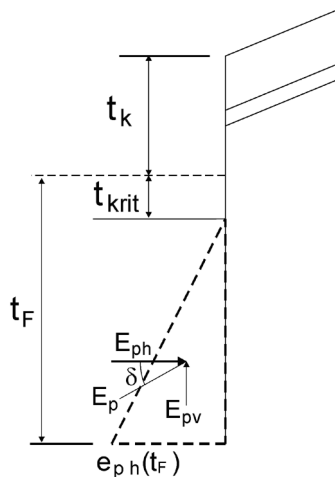
$$\Rightarrow (2'): \quad Q = \frac{E_p \cos \delta - C \cos \vartheta_p}{\sin(\vartheta_p + \varphi')}$$

$$\text{in (1):} \quad G' - U_v - (E_p \cos \delta - C \cos \vartheta_p) \cot(\vartheta_p + \varphi') + C \sin \vartheta_p + E_p \sin \delta = 0$$

$$\Rightarrow \quad E_p (-\cos \delta \cot(\vartheta_p + \varphi') + \sin \vartheta_p) = U_v - G' - C \sin \vartheta_p - C \cos \vartheta_p \cot(\vartheta_p + \varphi')$$

$$\Rightarrow \quad E_p = \frac{U_v - G' - C(\cos \vartheta_p \cot(\vartheta_p + \varphi') - \sin \vartheta)}{-\cos \delta \cot(\vartheta_p + \varphi') + \sin \delta}$$

$$\text{mit } C = \frac{c'(t_F - t_{\text{krit}})}{\sin \vartheta_p} \quad \text{und} \quad G' = \frac{(t_F - t_{\text{krit}})^2 \gamma'}{2 \tan \vartheta_p}$$



horizontale Komponente des passiven Erdwiderstandes (s. Bild)

$$E_{\text{ph}} = E_p \cos \delta = \frac{1}{2} (t_F - t_{\text{krit}})^2 e_{\text{ph}}(t_F)$$

$$\Rightarrow \quad e_{\text{ph}}(t_F) = \frac{2E_p \cos \delta}{(t_F - t_{\text{krit}})^2}$$

Gesamtinhaltsverzeichnis aller bisher erschienenen Mitteilungsblätter

Hinweis: Die erste Zahl steht für die fortlaufende Nummerierung, die zweite Zahl für das Erscheinungsjahr, danach werden Autor und Titel des Beitrages aufgeführt.

- 1/53 Jambor: Erhöhung der festen Wehrschwelle bei gleicher hydraulischer Leistung
Burghart: Die Verteilung der Abflußmenge über den Querschnitt
Türk: Untersuchung über die Geschiebebewegung in Flüssen und Stauanlagen. Das elektro-akustische Geschiebe-Abhörverfahren
Zweck: Flach- und Pfahlgründungen in weichem tonigem Schluff
Canisius: Aus der Arbeit der Bundesanstalt
Liebs: Ausbau der Unteren Hunte
Schleiermacher: Sicherung der Schifffahrtsrinne in der Donau im Bereich der Innmündung bei Passau
Boos: Vom wasserbaulichen Versuchswesen in England
- 2/53 Canisius: Technische Entwicklung im Wasserbau
Pichl: Der Ortungstachygraph und seine Anwendung
Burghart/Gehrig: Beitrag zur Frage der Geschwindigkeitsverteilung in offenen Gerinnen
Davidenkoff: Grundwasserzufluß zu Brunnen und Gräben
Sagawe: Der Dehnungsmeßstreifen als Meßelement bei erd- und wasserbaulichen Modellversuchen
Zweck: Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Pfählen (I)
- 3/54 Canisius: Die Bodenmechanik im Dienste des Wasserbaues
Wehrkamp: Ein neues Flußprofilmeßgerät
Liebs: Abzweigung einer verhältnismäßigen Teilwassermenge an einem Meßwehr
Schleiermacher: Gestaltung schräg angeströmter Brückenpfeiler
Zweck: Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Pfählen (II)
Meenen: Reiseeindrücke von einem Einsatz der Bundesanstalt in Venezuela
- 4/54 Jambor: Die Gestaltung von Kanalabzweigungen unter besonderer Berücksichtigung von Schwingungen im Kanal
Herr: Spülvermögen bei Verschlämmung und Geschiebeablagerung in einem Wehrfeld mit höckerartig erhöhter Wehrschwelle
Wehrkamp: Das Flußprofilzeichengerät von Dr. Fahrentholz
Davidenkoff: Gefährdung der Stauwerke bei Unterströmung
Zweck: Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Pfählen (III)
- 5/55 Canisius: Die Bundesanstalt für Wasserbau. Ein Rückblick auf ihre Entwicklung 1948 -1955
Niebuhr: Kritische Betrachtungen zur Frage der Modellrauhigkeit (I)
Schleiermacher: Wasserspiegelaufnahmen in Flußkrümmungen und Wasserspiegelquergefälle
Gehrig: Überprüfung hydrographischer Angaben durch den Modellversuch
Poggensee: Die Grundformel zur Bestimmung der Schleusenleistung
Zweck/Davidenkoff: Die versuchstechnischen Verfahren zur Berechnung des Netzes einer Grundwasserströmung
- 6/56 Schleiermacher: Geschwindigkeits-Verlagerung in Querschnitten mittels Buhnen oder Leitwerken
Gehrig: Messung und Berechnung von Kräften an Schiffen im Modell
Wigand: Verhinderung von Geschiebeablagerungen vor den unteren Schleusenvorhöfen und Staustufen
Zweck/Davidenkoff: Über die Zusammensetzung von Filtern
Poggensee: Anwendung und Kritik von Rammformeln
- 7/56 Gehrig: Strömungsmessung mit einem Kreiszyylinder
Zweck/Davidenkoff: Untersuchung von Sicherungsmaßnahmen an Flußdeichen durch Modellversuche
Schleiermacher: Einfache Darstellung des zeitlichen Ablaufes von Anschwellungen in Wasserläufen
Niebuhr: Beitrag zur Erfassung der Räumkraft einer ungleichförmigen Strömung unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse im Tidegebiet
Davidenkoff: Angenäherte Ermittlung des Grundwasserzuflusses zu einer in einem durchlässigen Boden ausgehobenen Grube

- 7/56 Liebs: Abflußbeiwerte für grasbewachsene Deiche
Jambor: Formgebung des Trennpfeilers in Flußkraftwerken
- 8/57 Yalin: Die theoretische Analyse der Mechanik der Geschiebebewegung
Davidenkoff: Durchsickerung durch Deiche und Erddämme (I)
- 9/57 Zweck/Davidenkoff: Auftrieb unter Wehren auf durchlässigem Grund
Davidenkoff: Wirkung der Sickerströmung auf die Standsicherheit eines Erddammes (II)
Schleiermacher: Versuch einer morphologischen Begründung von Rauigkeits-Beiwerten für die Berechnung des Wasserspiegel-Gefälles
Yalin: Ermittlung des Querschnittes mit maximalem Geschiebetransportvermögen
- 10/58 Magens: Untersuchung der Ursachen und des Vorganges der Verschlickung der Schleusenvorhöfen zu Brunsbüttelkoog
- 11/58 Rubbert: Die Vertiefung der Tideflüsse und ihre Problematik
Gruhle: Verformungsmessungen an den Spundwänden der Schleuse Friedrichsfeld
Gehrig: Der Verbau von Übertiefen und die Erhaltung des Fahrwassers
Davidenkoff: Durchsickerung durch Deiche und Erddämme (Schluß aus 8 und 9)
- 12/59 Zweck/Dietrich: Zur Ermittlung der Verteilung des Coulomb'schen Erddruckes
Zweck: Versuchsergebnisse über die Zusammensetzung von Filtern
Rubbert: Die Tiderechnung als Problem der Numerischen Analysis
- 13/59 Zweck/Dietrich: Die Berechnung verankerter Spundwände in nicht bindigen Böden nach ROWE
Felkel: Der Schwellbetrieb der Flußkraftwerke
Steinfeld: Über den Erddruck an Schacht- und Brunnenwandungen
- 14/60 Felkel: Walzenbucht und Ringgraben als Mittel zur Verminderung der Schwebstoffablagerungen in Flußhäfen
Davidenkoff: Neue Forschungsarbeiten über die Konsolidierung wassergesättigter bindiger Böden
Gehrig/Herr: Beitrag zur Ermittlung des Wasserdruckes auf gekrümmte Flächen
- 15/60 Jambor: Lage und Gestaltung der Schleusen und ihrer Zufahrten
Felkel: Wasserspiegelmessungen an einer festen Wehrschwelle
Felkel: Gemessene Abflüsse in Gerinnen mit Weidenbewuchs
- 16/61 Felkel: Die Modelluntersuchungen für zehn Moselstaustufen
Davidenkoff: Sickerverluste bei Durch- und Unterströmung von Deichen
Dietrich: Schnittgrößen und Randspannungen in der Sohlfuge einer Kaimauer oder Stützmauer von rechteckigem Querschnitt
- 17/62 Kleinschmidt/Schröder: Sonderheft Korrosionsversuche
- 18/62 Felkel: Der Einsatz frei fahrender Modellschiffe beim flußbaulichen Versuch
Vollmer: Erfahrungen an einem Tidemodell mit beweglicher Sohle und Vergleich zwischen Modell- und Naturmessungen
Felkel: Ein einfaches Rundbecken zum Mischen von Wasser und Koagulieren von Schmutzstoffen
Davidenkoff: Über die Berechnung der Sickerverluste aus Kanälen
- 19/63 Zweck/Dietrich: Modellversuche mit steifen Dalben in bindigen Böden bei plötzlicher Belastung
Jansen: Die Neukonstruktion von Fahrstühlen für Kraftmessungen an Modellschiffen
Felkel: Die Neckartalplanung im Raume Heilbronn
Jänke: Überprüfung der Brauchbarkeit von Pfahlformeln anhand von Probelastungen und Messungen an Stahlpfählen
- 20/64 Franke: Die Strömungsvorgänge bei unvollkommenen Brunnen
- 21/64 Naujoks: Untersuchungen zum Nachweis eines spezifischen Sättigungsgrades
Dietrich: Zur Berechnung der Tragfähigkeit starrer Dalben in homogenen Böden
Liebs: Die Abschirmung von Seehäfen gegen Seegang
Franke: Der Einfluß des Neigungswinkels der wasserführenden Schicht und einer partiellen Auskleidung des durchlässigen Brunnenschachtes auf die Zuflußmenge zu einem artesischen Brunnen
- 22/65 Rubbert: Tidewellenberechnungen nach dem Universalprogramm der BAW „Anwendung zur Berechnung der Tidebewegung der Oberelbe“
Jambor: Schutz der Sohle in Flüssen

- 22/65 Davidenkoff/Franke: Untersuchung der räumlichen Sickerströmung in eine umspundete Baugrube in offenen Gewässern
- 23/66 Dietrich: Modellversuche mit biegsamen langen Dalben unter wiederholten Belastungen im Sand
Ruck: Untersuchungen der Sandwandungsverhältnisse im Küstenbereich zwischen Stohl und Brauner Berg
Dietz: Einfluß der Saugschlauchbeaufschlagung bei Kaplanturbinen auf die Schifffahrtsverhältnisse im Unterwasser von Staustufen
Felkel/Canisius: Elektronische Berechnung von Wasserspiegellagen
- 24/66 Völpel/Samu: Reliefänderungen in der Tidestromrinne des Wangerooger Fahrwassers im Verlaufe einer Sturmperiode und in der darauf folgenden Periode mit ruhigeren Wetterlagen
Schnoor: Über neue Verfahren zur Berechnung des Reflexionsdruckes von Wasserwellen auf senkrechte Wände
Zweck: Baugrunduntersuchungen mit Sonden gem. DIN 4094 mit Auswertungsmöglichkeiten
Davidenkoff/Franke: Räumliche Sickerströmung in eine umspundete Baugrube im Grundwasser
- 25/67 Schnoor: Über verschiedene Verfahren zur Berechnung der Wellenangriffskräfte nicht brechender Wellen auf senkrechte Pfähle und Wände
Davidenkoff: Dimensionierung von Brunnenfiltern
Franke: Die Wirkungen des Wassers auf die Standsicherheit von Böschungen
Schulz/Ruck: Die Sandwanderungsverhältnisse an der Nordküste der Insel Fehmarn zwischen Westermarkelsdorf und Puttgarden
Lambert: Die Erscheinung der Gezeiten und ihre Erklärung
- 26/68 Schnoor: Über verschiedene Verfahren zur Berechnung der Wellenangriffskräfte auf senkrechte Pfähle und Wände
Samu: Ergebnisse der Sandwanderungsuntersuchungen in der südlichen Nordsee
Ruck: Auswirkung der geologischen Verhältnisse im Küstengebiet auf Baumaßnahmen im Wasserbau
- 27/68 Schäle/Kuhn/Schröder/Hofmann: Kanal- und Schifffahrtsversuche Bamberg 1967
- 28/69 Jänke: Untersuchungen der Zusammendrückbarkeit und Scherfestigkeit von Sanden und Kiesen sowie der sie bestimmenden Einflüsse
Felkel: Der Weg zum vollständigen mathematischen Flußmodell
- 29/69 Dietz: Kolk-sickerung durch Befestigungsstrecken für das Eidersiel
Dietz: Kolk-sicherung am Elbewehr Geesthacht
- 30/70 Franke/Manzke: Zwei interessante Beispiele von den Erdbauaufgaben am Elbe-Seitenkanal
Franke: Einige Beispiele zur Strömungsdruckwirkung des Grundwassers
Felkel: Ideestudie über die Möglichkeiten der Verhütung von Sohlenerosionen durch Geschiebezufuhr aus der Talaue ins Flußbett, dargestellt am Beispiel des Oberrheins
Jurisch: Beitrag zur Verwendung von Durchflußgleichung bei Dreieck-Überfällen
Sindern/Rohde: Zur Vorgeschichte der Abdämmung der Eider in der Linie Hundeknöll-Vollerwiek
Harten: Abdämmung der Eider; Modellversuche im Tidemodell
Dietz: Abdämmung der Eider; Modellversuche für das Sielbauwerk
- 31/72 Giese/Teichert/Vollmers: Das Tideregime der Elbe - Hydraulisches Modell mit beweglicher Sohle
Dorer: Berechnung der nichtstationären Abflüsse in nicht-prismatischen offenen Gerinnen
Dietz: Ausbildung von langen Pfeilern bei Schräganströmung am Beispiel der BAB-Mainbrücke Eddersheim
Dietz: Systematische Modellversuche über die Pfeilerkolkbildung
- 32/72 Niebuhr: Einfluß der Seitenwände bei hydraulischen Versuchen in einer rechteckigen Glasrinne
Ache: Ergebnisse von Sondierungen neben einem eingespülten Gründungskörper einer Leuchtbake
Franke/Ache: Ein Verfahren zur Berechnung eingespannter gedrungener Gründungskörper
Franke/Garbrecht/Kiebusch: Meßfehler infolge unvollkommener Volumenkonstanz von Porenwasserdruckgebern beim Scherversuch
Franke/Bernhard: Erdruckansatz bei trogförmigen Bauwerken und Wechselwirkung zwischen Erd- und Sohldruck am Beispiel des Schiffshebewerkes Lüneburg
Felkel: Das Sohlenkorn des Rheins zwischen Straßburg und Bingen
Giese: Fahrwasserumbildungen in der Unter- und Außenelbe

- 33/72 Rohde/Meyn: Untersuchungen über das hydrodynamische Verhalten oberflächenmarkierten Sandes und über die Einbringmethode bei Leitstoffuntersuchungen
Ruck: Erfahrungen beim Präparieren von Sand für Leitstoffuntersuchungen
Dietz: Kolksicherung am Störsperrwerk
Hein: Verhalten von Rost unter nicht absolut dichten Beschichtungen bei Anlegen von kathodischem Schutz im Stahlwasserbau
- 34/73 Hovers: Der Einfluß von Strombauwerken auf die morphologische Entwicklung der Stromrinnen im Mündungsgebiet eines Tideflusses, untersucht am Beispiel der Außenweser
- 35/73 Davidenkoff: Anwendung von Bodenfiltern im Wasserbau
Tödten: Beitrag zur Energiedissipation von Tosbecken im Modellversuch
Hein: Sulfatangriff des Meerwassers auf Beton? Ein Beitrag zur Klärung der Frage, warum Meerwasser trotz hohen Sulfatgehaltes Beton nicht angreift
Jurisch: Messung der Momentangeschwindigkeiten mit Hilfe der Laser-Doppler-Anemometrie
Pulina: Geschwindigkeitsmessungen an einer Bootsgasse
Dietz: Modelluntersuchung der Schleusenvorhöfen an der Rheinstaustufe Iffezheim
List: Untersuchungen von instationär belasteten Kunststoff-Filtern für den Wasserbau
- 36/74 Dietz: Hydraulische Probleme bei der Planung von Staustufen
Felkel: Modellversuche mit Grundswellen und Schifffahrt
Dietz/Pulina: Wahl der Wehrverschlüsse beim Ausbau der Saar zur Schifffahrtsstraße
- 37/75 Tödten: Untersuchung der Strömungsvorgänge an Buhnen
Schuppener: Erddruckmessungen am Schiffshebewerk Lüneburg
Harten/Knieß: Eiderdamm - Natur- und Modellmessungen
Dietz: Wellenmessungen im Hafen Travemünde - Vergleich zwischen Natur und Modell
- 38/75 Schuppener: Der Erddruck einer rolligen Hinterfüllung auf eine unverschiebliche Stützwand infolge der Verdichtung
Felkel: Untersuchungen der Veränderungen der Höhenlage der Sohle des Oberrheins
Samu: Beitrag zur morphologischen Entwicklung der Außenjade
- 39/76 Dietz/Pulina: Modelluntersuchungen zur Gestaltung der Hauptbauwerke an der Rheinstaustufe Iffezheim
- 40/76 Dietz/Pulina: Zur Wahl des Zugsegmentes als Wehrverschluß bei Ausbau der Saar
Knieß: Eiderdamm - Wiederauffüllung von Baggerlöchern im Watt
Annuß/Dehm/Hein/Schröder: Korrosion an Spundwänden - Wand-Dickenmessungen mit Ultraschall
Dietz/Pulina: Zur Problematik der Querströmungen in Vorhafenzufahrten und ihre Untersuchung im Modell
Dietz: Zur Frage der Nachbildung von Kolkvorgängen im Modell
- 41/77 Armbruster: Vergleich berechneter und gemessener Grundwasserstände am Beispiel Kehl
Döscher: Die Suspensionswand
Feddersen: Querbelaastete Verankerungen
Franke/Garbrecht: Drei Serien von Probelastungen an Großbohrpfählen in Sand-Ziel-Methode - Ergebnisse
Franke/Schuppener: Besonderheiten beim Gründungsgutachten für ein flachgegründetes off-shore-Bauwerk
Hauß: Beispiele für die Anwendung statistischer Methoden in der Bodenmechanik
Kiekbusch: Elektrisches Messen von Volumenänderungen beim Triaxialversuch
Ruck: Sondierungen zur Erkundung unterhalb der Gewässersohle von schwimmender Arbeitsplattform
Sagawe: Kraft- und Spannungsmessungen an der Containerkaje in Bremerhaven
Schulz: Überlegungen zur Führung des Nachweises der Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge
- 42/77 Hein: Untersuchung über den Korrosionsablauf an wetterfesten Stählen in Abhängigkeit von der Entfernung zum Meer
Knieß: Bemessung von Schüttstein-Deckwerken im Verkehrswasserbau; Teil I: Lose Steinschüttungen
Hein: Zum Korrosionsverhalten von Zink in salzhaltigen Wässern
- 43/78 Dietz: Strömungsabweiser und/oder durchbrochene Trennmole als Mittel zur Verminderung der Querströmung in oberen Vorhafenzufahrten am Beispiel der neuen Mainstaustufe Krotzenburg
Knieß: Belastungen der Böschung des NOK durch Schiffsverkehr - Ergebnisse von Naturmessungen

- 44/79 Pulina: Modelluntersuchungen für die Saarstaustufe Rehlingen
Jurisch: Untersuchungen über die Abflußverhältnisse im Bereich einer Grundschwelle
- 45/79 Dietz/Pulina: Zur Frage des Wehrschwellenprofils beim Zugsegment
Dorer/Siem Hou Lie: Schwall- und Sunkberechnungen mit impliziten Differenzenverfahren
- 46/80 Garbrecht: Auswertung von Setzungsmessungen - zwei Beispiele -
Liebig: Stabilitätsuntersuchungen von Mehrfachregelkreisen an hydraulischen Modellen im wasserbaulichen Versuchswesen
Franke: Studie zur Frage des Einflusses von Meereswellen auf die Größe des Sohlwasserdruckes unter Offshore-Flachgründungen
Armbruster: Die Sickerwasserströmung im Bereich der Stauanlage Kulturwehr Kehl -
Teil I: Unterströmung und Standsicherheit im Endzustand
- 47/80 Felkel: Die Geschiebeabgabe als flußbauliche Lösung des Erosionsproblems des Oberrheins
- 48/80 Giese: Das Tideregime der Elbe - Hydraulisches-Modell mit beweglicher Sohle
Schulz/Feddersen/Weichert: Zwängungskräfte infolge Sohlreibung
- 49/81 Pulina/Voigt: Hydrodynamische Belastung der Wehrverschlüsse an den Saarstufen Rehlingen, Mettlach und Schoden sowie Abflußleistungen bei spezifischen Betriebsfällen – Modelluntersuchungen
- 50/81 Schulz: Zur Festigkeit überverdichteter Tone
Gehrig: Die Berechnung des Geschiebetriebanfanges
Knieß: Schütten von Steinen unter Wasser
Wulzinger: Sedimenttransport und Sohlausbildung im Tidemodell der Elbe mit beweglicher Sohle
- 51/82 Pulina/Voigt: Einfluß der Randbedingungen auf die Abflußleistung unterströmter Wehrverschlüsse
Kemnitz: Beitrag zur Verringerung der Quergeschwindigkeiten im unteren Schleusenvorhafen einer Staustufe
Hein/Klein: Untersuchung über den Temperatureinfluß auf das Korrosionsverhalten von ungeschütztem Stahl im Emdener Hafenwasser
- 52/83 Pulina/Voigt: Neubau eines Wehres im Zitadellengraben Berlin-Spandau
Knieß: Untersuchung zum Nachweis der Wirtschaftlichkeit von Uferdeckwerken an Wasserstraßen
- 53/83 Knieß: Kriterien und Ansätze für die technische und wirtschaftliche Bemessung von Auskleidungen in Binnenschiffahrtskanälen
- 54/84 Dorer: Ähnlichkeit bei flußbaulichen Modellen
- 55/84 Knieß: Untersuchung und Begutachtung alter Massivbauwerke an Wasserstraßen
Wagner: Die Untersuchung von Stahlwasserbauten
Hein: Korrosion über und unter dem Wasserspiegel
Hallauer: Grundsätzliche Betrachtungen über den Schutz und die Instandsetzung von Betonbauwerken
Abromeit: Anwendung von geotextilen Filtern bei Uferdeckwerken von Wasserstraßen in der BRD
Knieß/Köhler: Untersuchung gebundener Steinschüttungen auf Flexibilität, Verbundfestigkeit und Wasserdurchlässigkeit
Kellner/Annuß/Kretschmer: Kurzberichte über Arbeiten des Referats „Meßtechnik“
- 56/85 Schulz: Die Ermittlung des Seitendrucks in überkonsolidierten Tonen mit Hilfe von Laborversuchen
Schuppener: Verformungsmessungen im Erd- und Grundbau
Köhler: Modellversuche für die Dimensionierung von Deckwerken an Wasserstraßen - Stabilität loser Steinschüttungen
- 57/85 Armbruster: Messungen, Inspektion und Kontrolle an Dämmen
Pulina/Voigt: Lastbeanspruchungen langgestreckter Bauwerke in der Wasserstraße
- 58/86 Dorer: Stabilitätsformeln für lose Deckschichten von Böschungs- und Sohlenbefestigungen
Schulz: Kompressibilität und Porenwasserüberdruck - Bedeutung für Gewässersohlen
Hallauer: Vergußstoffe für Uferdeckwerke
Eißfeldt: Standsicherheitsbeurteilung alter Hafenanlagen am Beispiel der Woltmann Kaje Cuxhaven
Reiner/Schuppener: Gründungsbeurteilung und Sicherung des Weserwehres in Bremen
Knieß: Verfahren zur Untersuchung von Spanngliedern

- 59/86 Samu: Ein Beitrag zu den Sedimentationsverhältnissen im Emdener Fahrwasser und Emdener Hafen
Armbruster/Venetis: Der Einfluß von zeitweilig überstauten Polderflächen auf das Grundwasser
Müller/Renz: Erfahrungen bei der Untersuchung von Dükern und Durchlässen
Hein: Über das Korrosionsverhalten von Stahlspundwänden im Mittellandkanal
- 60/87 Rohde: 25 Jahre Außenstelle Küste
Dietz: Untersuchungen in den Tidemodellen der Außenstelle Küste
Kiekbusch: Entwicklung des Hamburger Bodenmechanischen Labors der BAW
Schuppener: Erfahrungen mit Bodenmechanischen Laborversuchen an Klei
Manzke: Erd- und grundbauliche Beratung beim Bau des Elbeseitenkanals
Schuppener/Eißfeldt: Standsicherheitsbeurteilung der Gründungen alter Wasserbauwerke
Alberts: Wanddickenmessungen an Stahlspundwänden
Harten: Das Staustufenmodell Weserwehr bei Bremen
Giese: Aufbau eines hydraulischen Tidemodells für das Lagunengebiet von Abu Dhabi
Fahse: Traceruntersuchungen in der Natur
Samu: Geomorphologische Untersuchungen im Bereich der Brammerbank und des Krautsander Watts in der Unterelbe
Jensen: Überlegung zur künftigen Entwicklung der Sturmflutwasserstände an der Nordseeküste
- 61/87 Lohrberg: Prof. W. Gehrig und seine Bedeutung für die Entwicklung des Modellversuchswesens in der WSV
Garbrecht: Erosion, Transport, Sedimentations-Probleme und Überlegungen im Altertum
Mosonyi: Geschiebeprobleme bei Hochdruckwasserkraftwerken
Vollmers: Probleme bei der praktischen Berechnung des Geschiebebetriebs
Nestmann/Bachmeier: Anwendung von Luftmodellen im strömungsmechanischen Versuchswesen des Flußbaus
Haferburg/Müller: Instandsetzung der Mittellandkanalbrücke 144 b über die Weser in Minden
- 62/88 Weichert: Kenngrößen von Bentonit-Zement-Suspensionen und ihre Bedeutung für die Eigenschaften von Dichtungswandmaterialien
- 63/88 40-Jahre Bundesanstalt für Wasserbau
- 64/88 Keil: Zur Untersuchung von Naturvorgängen als Grundlage für Ausbau und Unterhaltung der Bundeswasserstraßen im Küstenbereich
Holz: Moderne Konzepte für Tidemodelle
Vollmers: Reflexionen über Modelle mit beweglicher Sohle
Knieß: Einführungsansprache beim Festakt zur 40 Jahr-Feier der BAW am 08.11.88
Knittel: Ansprache anlässlich des 40jährigen Jubiläums der BAW in Karlsruhe am 08.11.88
Lenk: Verantwortungsprobleme im Wasserbau
Zimmermann/Nestmann: Ströme und Kanäle als Ingenieurbauwerke oder gestaltete Natur
Schulz: Standsicherheiten, Bemessungskriterien und Normen - Kontraindikationen eines naturnahen Flußbaus?
Lankenau: Technische Zwänge, Entwicklungen und Notwendigkeiten bei modernen Wasserstraßen
Reinhardt: Rechtliche Zwänge, Entwicklungen und Notwendigkeiten bei modernen Wasserstraßen
Kolb: Grundsätze der Landschaftsplanung bei der Gestaltung von Wasserstraßen
Larsen: Notwendiges Umdenken beim Ingenieur in Ausbildung und Praxis
Kennedy: Sediment, flood-control and navigation aspects of the Three Gorges Project, Yangtse river, China
- 65/89 Schröder: Auswirkung der Harmonisierung des EG-Binnenmarktes auf das Bauwesen
Flach: Normung für das Bauwesen im Rahmen eines europäischen Binnenmarktes
Litzner: Welche Auswirkungen haben die vorgesehenen europäischen Regelungen auf die deutschen Stahlbeton-Bestimmungen
Hallauer: Die Entwicklung der Zusammensetzung von Beton für Wasserbauten
Bayer: Einsatz der Betonbauweise bei Offshore-Bauwerken
Lamprecht: Verwendung von Beton bei Wasserbauten in der Antike
Rasmus: Entwicklung des Stahlbrückenbaus am Nord-Ostsee-Kanal (NOK)
Roehle: Der technische Fortschritt bei der Konstruktion und betrieblichen Ausbildung von Stahlwasserbauverschlüssen
Wagner: Untersuchung von Stahlwasserbauverschlüssen, vergleichende Auswertung und Folgerungen

- 66/89 Mühling: Entwicklung und Stand der Deckwerksbauweisen im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsgeschichte
Bartnik: Entwicklung und Stand der Deckwerksbauweisen im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsgeschichte West
Paul, W.: Deckwerksbauweisen an Rhein, Neckar, Saar
Paul, H. J.: Deckwerke unter ausführungstechnischen Gesichtspunkten
Möbius: Abrollen von Geotextilien unter Wasser
Saggau: Deichschlußmaßnahme Nordstrander Bucht
Lastrup: Dünensicherungsmaßnahmen an der dänischen Nordseeküste
de Groot: Allgemeine Grundlagen zur Standsicherheit des Untergrundes unter Deckwerken
Oumeraci: Zur äußeren Beanspruchung von Deckschichten
Richwien: Seegang und Bodenmechanik - Geotechnische Versagensmechanismen von Seedeichen
Köhler: Messungen von Porenwasserüberdrücken im Untergrund
Bezuijen: Wasserüberdruck bei Betonsteindeckwerken
Sparboom: Naturmaßstäbliche Untersuchungen an einem Deckwerk im Großen Wellenkanal
Heerten: Analogiebetrachtungen von Filtern
Hallauer: Baustoffe für Deckwerke
Saathoff: Prüfung an Geotextilien
Schulz: Überblick über neue nationale und internationale Empfehlungen
- 67/90 Hein: Zur Korrosion von Stahlspundwänden in Wasser
Kunz: Risikoorientierte Lastkonzeption für Schiffsstoß auf Bauwerke
Pulina/Voigt: Untersuchungen beim Umbau und Neubau von Wehranlagen an Bundeswasserstraßen
Zimmermann: Zur Frage zulässiger Querströmungen an Bundeswasserstraßen
Tsakiris: Kombinierte Anwendung der Dezimalklassifikation und von Titelstichwörtern zur Inhaltsschließung von Dokumenten
- 68/91 Knieß: Erweiterte Bundesanstalt für Wasserbau
Alf/Theurer: Prognose zur Entwicklung des Ladungspotentials für die Binnenschifffahrt in den neuen Bundesländern
Schulz: Zur Mobilisierung von Bewehrungskräften in nichtbindigen Böden
Ehmann: Bauwerksmessungen am Beispiel des Weserwehres
Hamfler: Temperatur- und Dehnungsmessungen während der Erhärtungsphase des Betons
Hauß: Verwendbarkeit von Waschbergen im Verkehrswasserbau
Köhler/Feddersen: Porenwasserdruckmessungen in Böden, Mauerwerk und Beton
- 69/92 Ohde: Nachdruck der Veröffentlichungen zu „Bodenmechanischen Problemen“
- 70/93 Knieß: 90 Jahre Versuchsanstalt für Wasserbau
Pulina: Bestimmung der zulässigen Strömungsgröße für seitliche Einleitungsbauwerke an Bundeswasserstraßen
Köhler u. a. m.: Wellenamplitudenmessungen mittels videometrischer Bildverarbeitung
Kuhl: Die Geschiebezugabe unterhalb der Staustufe Iffezheim von 1978 - 1992
Siebert: Simulation von Erosion und Deposition mit grobem Geschiebe unterhalb Iffezheim
Nestmann: Oberrheinausbau, Unterwasser Iffezheim
- 71/94 Nestmann/Theobald: Numerisches Modell zur Steuerung und Regelung einer Staustufenkette am Beispiel von Rhein und Neckar
Dietz/Nestmann: Strömungsuntersuchungen für das Eider-Sperrwerk
- 72/95 Fritsche: Modellversuche zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens von Fundamenten
Huth: Modellierung des zyklischen Materialverhaltens von Lockergestein
Holzlöhner: Einfluß des Bodens beim Schiffsstoß auf Bauwerke
Schuppener: Eine Proberammung vor einer Stützwand mit unzureichender Standsicherheit
Palloks/Zierach: Zum Problem der Prognose von Schwingungen und Setzungen durch Pfahlrammungen mit Vibrationsrammbären
Haupt: Sackungen im Boden durch Erschütterungseinwirkungen
Zerrenthin/Palloks: Beiträge zur Prognose von Rammerschütterungen mit Hilfe von Fallversuchen
Palloks/Dietrich: Erfahrungen mit Lockerungssprengungen für das Einbringen von Spundbohlen im Mergelgestein
Huber: Ein Beitrag zur Erschütterungsausbreitung bei Zügen

- 72/95 Achilles/Hebener: Untersuchungen der Erschütterungsemission für den Ausbau von Straßenbahnstrecken mit angrenzender historischer Bebauung
- 73/95 Westendarp: Untersuchungen und Instandsetzungsmaßnahmen an den Massivbauteilen des Eidersperrwerkes
Dietz: Strömungsverhältnisse, Kolkbildung und Sohlensicherung am Eider-Sperrwerk
Heibaum: Sanierung der Kolke am Eidersperrwerk - Geotechnische Stabilität von Deckwerk und Untergrund
- 74/96 Faist: Langfristige Wasserspiegelsenkungen und Grundsätze der Strombaumaßnahmen in der Erosionsstrecke der Elbe
Glazik: Flußmorphologische Bewertung der Erosionsstrecke der Elbe unterhalb von Mühlberg
Faulhaber: Flußbauliche Analyse und Bewertung der Erosionsstrecke der Elbe
Schmidt: Ergebnisse neuerer Untersuchungen zu Gewässersohle und Feststofftransport in der Erosionsstrecke
Alexy: Hydronumerische Untersuchungen zur Felsabgrabung und zum Einbau von Grundswellen in der Elbe bei Torgau
Fuehrer: Untersuchungen der Einsinktiefe von Bergfahrern im Stromabschnitt Torgau
Schoßig: Sohlenstabilisierung der Elbe km 154,62 - 155,70 im Bereich der Torgauer Brücken - praktische Durchführung -
Kühne: Sohleninstandsetzung im Stromabschnitt Klöden (El-km 188,8 - km 192,2)
- 75/97 Abromeit: Ermittlung technisch gleichwertiger Deckwerke an Wasserstraßen und im Küstenbereich in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte der verwendeten Wasserbausteine
Alberts/Heeling: Wanddickenmessungen an korrodierten Stahlspundwänden - Statistische Datenauswertung zur Abschätzung der maximalen Abrostung -
Köhler: Porenwasserdruckausbreitung im Boden, Messverfahren und Berechnungsansätze
- 76/97 Krause: Ansprache anlässlich der Verabschiedung von Prof. Dr.-Ing. Schulz
Schwieger: Monitoringsystem zur Überwachung der Fugendichtigkeit an der Schleuse Uelzen
Köhler: Boden und Wasser - Druck und Strömung
Armbruster-Veneti: Leckageortung an Bauwerken der WSV mittels thermischer Messungen
Schulz: Rückblick auf 23 Jahre Geotechnik in der BAW
Schuppener: Gedanken zu den zukünftigen Aufgaben der Geotechnik in der BAW
- 77/98 Armbruster-Veneti et al.: Das Schawan-Wehr in Karelien - Zustand und Lebensdauer
Fuehrer: Untersuchungen zur hydraulischen Beanspruchung der Wasserstraßen durch die Schifffahrt
Jurisch: Untersuchung der Genauigkeiten von Tachymeter- und DGPS-Ortungen zur Ermittlung hydraulischer und hydrologischer Daten in Flüssen
Lasar/Voigt: Gestaltung des Allertentlastungsbauwerkes I am MLK
- 78/98 50 Jahre Bundesanstalt für Wasserbau
- 79/98 Heinz: Konzeptionelle Überlegungen zur Nutzung der Wasserstraßen bei Eis
Barjenbruch: Wärmehaushalt von Kanälen
Klüssendorf-Mediger: Prognose von Eiserscheinungen auf ostdeutschen Wasserstraßen
Brydda: Chancen eines garantierten Ganzjahresverkehrs auf mitteleuropäischen Kanälen
Busch: Eissituation an den Wasserstraßen der WSD Süd
Voß: Eisbildung und Eisauflauf auf den Binnenwasserstraßen der WSD Ost
Rupp: Eisbrechende Fahrzeuge und deren Einsatzmöglichkeiten bei Eisbedeckung
Kaschubowski: Eisfreihaltung mit Luftsprudelanlagen
Sachs: Tauchmotorpropellerpumpen zur Eisfreihaltung von Stemmtoren
Alexy: Eisdruck auf Kanalbrücken
Alexy: Optimierung der Eisabführung an Brücken
- 80/99 Kirchdörfer: Donauausbau Straubing - Vilshofen - vertiefte Untersuchungen - Ziele, Varianten, Organisationsstruktur
Hochschopf: Donauausbau Straubing - Vilshofen - vertiefte Untersuchungen - Baumaßnahmen
Naturversuch Sohlendeckwerk
Jurisch/Orlovius: Durchführung und Rohdatenauswertung
Strobl: Steinschlaguntersuchungen zur Ermittlung vertikaler Sicherheitsabstände in der Schifffahrt
Zöllner: Fahrdynamische Untersuchungen der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e. V., Duisburg, zum Donauausbau Straubing - Vilshofen

- 80/99 Neuner: Untersuchungen zu den horizontalen Sicherheitsabständen in einem mit Bühnen geregelten Flussabschnitt
Nestmann: Luftmodelluntersuchungen zu Kolkverbaumaßnahmen
Kellermann: Donauausbau Straubing - Vilshofen - vertiefte Untersuchungen - 1D-Modellverfahren - Modelltechnik, 3D-Untersuchungen, Bühnen, flussmorphologische Änderungen
Söhngen: Fahrdynamische Modelluntersuchungen
Roßbach/Kaupfert: Physikalischer Modellversuch Isarmündung
- 81/00 Beucke: Festvortrag - Bauinformatik als Verbundstelle zwischen Bauingenieurwesen und Informatik
Siebels: Wie kam es zum Standort Ilmenau
KSP Engel und Zimmermann Architekten: Neubau der Dienststelle der Bundesanstalt für Wasserbau in Ilmenau
Siebels: Kunstwettbewerb für den Neubau der Dienststelle der Bundesanstalt für Wasserbau in Ilmenau
Paul: Erwartungen der WSV an die BAW-Dienststelle in Ilmenau
Bruns: Informations- und Kommunikationstechnik - Perspektiven und Visionen -
Bruns: Zur Geschichte der Datenverarbeitung in der BAW
Fleischer: Zur Begutachtung der Standsicherheit alter, massiver Verkehrswasserbauten
Palloks: Die Entwicklung der Aufgaben des Referats Baugrunderdynamik (BD)
Palloks: Bericht über das BAW - Kolloquium „Setzungen durch Bodenschwingungen“ in der Außenstelle Berlin am 29.09.1999
- 82/00 Oebius: Charakterisierung der Einflussgrößen Schiffsumströmung und Propellerstrahl auf die Wasserstraßen
Zöllner: Schiffbauliche Maßnahmen zur Reduzierung der Sohlbeanspruchung
Rieck/Abdel-Maksoud/Hellwig: Numerische Berechnung der induzierten Geschwindigkeiten eines Binnenschiffes im Flussbett bei Bergfahrt
Fuehrer/Pagel: Formparameter- und Tiefgangseinflüsse auf die erreichbare Schiffsgeschwindigkeit und schiffsinduzierte Sohlströmung im allseitig begrenzten Fahrwasser – Ergebnisse der 3D-Modellierung der Schiffsumströmung nach FANKAN
Willamowski: Anwendung hydraulischer und fahrdynamischer Bewertungskriterien zur Beurteilung der Befahrbarkeit von Flüssen am Beispiel der Unteren Saale
Söhngen/Heer: Einfluss des mittleren Rückströmungsfeldes auf den Geschiebetransport am Beispiel des Rheins bei Westhoven
Abromeit: Deckwerksschäden durch Verockerung des geotextilen Filters und Sanierungsmethode
Alexy: Ermittlung der Kolkiefen und der erforderlichen Sohlenbefestigung im Bereich einer Brückenbaustelle in der Elbe
Faulhaber: Veränderung von hydraulischen Parametern der Elbe in den letzten 100 Jahren
Hentschel/Kauther: Hochgeschwindigkeitsvideokamera im wasserbaulichen und geotechnischen Versuchswesen
Gladkow/Söhngen: Modellierung des Geschiebetransports mit unterschiedlicher Korngröße in Flüssen
Glazik: Historische Entwicklung des wasserbaulichen Modellversuchswesens in den Versuchsanstalten Berlin-Karlshorst und Potsdam
- 83/01 Aster: Bauwerksinstandsetzung und Kernaufgaben - Ein Widerspruch?
Hermening: Anforderungen der WSV an die BAW bezüglich der Beratung bei der Instandhaltung der Anlagen
Kunz/Bödefeld: Von der Bauwerksinspektion zum Bauwerksmanagement
Westendarp: Betoninstandsetzung - Neue Anforderungen und Entwicklungen
Strobl/Wildner: Injektion mit hydraulischem Bindemittel im porösen Massenbeton
Meinhold: Instandsetzungsmöglichkeiten und -grenzen für Stahlwasserbauten
Binder: Arbeits- und Umweltschutz bei Korrosionsschutzarbeiten
Beuke: Gestalterische Aspekte bei der Modernisierung der Schleuse Woltersdorf
- 84/02 Butow: Zusammenarbeit der Sankt-Petersburger Staatlichen Universität für Wasserkommunikationen mit der Bundesanstalt für Wasserbau
Armbruster: Ausgewählte Aspekte der Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Geotechnik
Kljujew: Deformationen der Schleusenkammerwände an der Wolga-Ostsee-Wasserstraße
Ogarjow/Koblew: Zustand und Entwicklungsperspektiven der Kaspi-Schwarzmeer-Wasserstraße
Radionow: Rekonstruktion des Moskau-Kanals
Bödefeld: Auswertung der Bauwerksinspektion

- 84/02 Dettmann/Zentgraf: Pegelabhängige Fahrspurberechnung in fließenden Gewässern
Kemnitz: Modellierung des Geschiebetransports in Flüssen
Kemnitz: Untersuchung von Schleusenfüllsystemen am Beispiel der neuen Hafenschleuse Magdeburg
Lausen: Numerische 3D-Simulation der Moselstaustufe Lehmen
Odenwald: Prüfung und Beurteilung der Baugrubenabdichtung für den Schleusenneubau Uelzen II im Elbe-Seitenkanal
Paul: Donauausbau Straubing - Vilshofen
Stenglein: Unterhaltungskonzept für den freifließenden Rhein
- 85/02 Empfehlungen zur Anwendung von Oberflächendichtungen an Sohle und Böschung von Wasserstraßen
Annandale et al.: Fallstudien zur Kolkbildung / Scour Case Studies
Heibbaum: Geotechnische Aspekte von Kolkentwicklung und Kolkenschutz / Geotechnical Parameters of Scouring and Scour Countermeasures
Richardson et al.: Praktische Berechnungen zu Kolken an Brücken in den USA / United States Practice for Bridge Scour Analysis
Bielke: Funktionale Leistungsbeschreibung bei der Ausschreibung von Wasserfahrzeugen
Dobinsky/Sosna: Einsatz dieselektrischer Schiffsantriebe
Lenkeit/Stryi: Modernisierung der Fähren entlang des NOK
Stumpe: Verlängerung MzS MELLUM
Garber: Entwicklung eines Sandhobels
Claußen: Entwicklung und Einsatz von flachgehenden Aufsichts- und Arbeitsschiffen (Typ Spatz)
Kühnlein: Modellversuchswesen im Schiffbau
Germer: Antifouling (TBT-Alternativen)
Christiansen: Umweltverträgliche Schmierstoffe und Hydrauliköle
Hoffmann: Fächerlot- und Sonarsysteme
Preuß: Einsatz von AIS/VDR an Bord
- 86/03 Jürges/Winkel: Ein Beitrag zur Tidedynamik der Unterems
Lang: Ein Beitrag zur Tidedynamik der Innenjade und des Jadebusens
Schüttrumpf/Kahlfeld: Hydraulische Wirkungsweise des JadeWeserPorts
Schubert/Rahlf: Hydrodynamik des Weserästuars
Boehlich: Tidedynamik der Elbe
Seiß/Plüß: Tideverhältnisse in der Deutschen Bucht
Winkel: Das morphologische System des Warnow-Ästuars
Rudolph: Sturmfluten in den deutschen Ästuaren
Liebetruth/Eißfeldt: Untersuchungen zur Nautischen Sohle
Uliczka/Kondziella: Dynamisches Fahrverhalten extrem großer Containerschiffe unter Flachwasserbedingungen
Bielke/Siebeneicher: Entwicklung, Planung und Neubau von Wasserfahrzeugen
Heyer: Zur Bedeutung mathematischer Modelle im Küstenwasserbau
Lang: Analyse von HN-Modell-Ergebnissen im Tidegebiet
Weilbeer: Zur dreidimensionalen Simulation von Strömungs- und Transportprozessen in Ästuaren
Malcherek: Vom Sohlevolutions- zum vollständigen Morphologiemodell: Eine Road Map zur SediMorph-Entwicklung
Vierfuss: Seegangmodellierung in der BAW
- 87/04 Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen