



Projektbüro Fahrrinnenanpassung

Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe

Gutachten Betroffenheiten Dritter

Böschungsverformung durch Schiffsanprall

Berichts-Nr. 9090-01

Anlage 3 zur Unterlage J.1

Hamburg, 21. Februar 2006



INGENIEURGESELLSCHAFT MBH

Inhalt	Seite
1 Literaturrecherche	1
1.1 Schiffsanprall von Binnenschiffen	1
1.2 Weiterführende Arbeiten	3
1.3 Schiffsanprall als Risikoabschätzung	3
1.4 Begriffe	3
2 Vereinfachtes Modell von IMS	4
2.1 Annahmen	4
2.2 Berechnungsmodell	5
2.3 Lösung der Bewegungsgleichung	6
2.3.1 Erstellen der Kraft Weg Beziehung und ihre näherungsweise Beschreibung durch eine Polynomfunktion	6
2.3.2 Aufstellen der Differentialgleichung mit Hilfe der gefundenen Kraft-Weg-Beziehung	8
2.3.3 Lösen der Differentialgleichung	8
2.3.4 Extremwertsuche der gefundenen Lösungsfunktionen	9
2.3.5 Energieansatz	9
3 Berechnungen	11
3.1 Annahmen	11
3.2 Baugrund und Böschungsneigung	12
3.2.1 Baugrund	12
3.2.2 Böschungsneigung	13
3.3 Darlegung der bodenphysikalischen Berechnungen	14
3.4 Diskussion der Ergebnisse	16
4 Überlegungen zur Eintrittswahrscheinlichkeit	17
5 Zusammenfassung	19
Tabellen	
Tabelle 3-1: Rechenwerte der bodenmechanischen Kenngrößen im Böschungsbereich	13
Tabelle 3-2: Senkrechte Eindringtiefen für Sande bei 7 Grad Böschungsneigung	15
Tabelle 3-3: Horizontaler Eindringweg für Sande bei 7 Grad Böschungsneigung	16
Tabelle 4-1: Eintrittswahrscheinlichkeiten nach Formel (8) bzw. (9)	18
Tabelle 5-1: Senkrechte Eindringtiefen für ein Schiff mit einer verdrängten Masse von 150.000 t für unterschiedliche Sande bei 7 Grad Böschungsneigung nach Lösung der Bewegungsgleichung mit festgewählten Randbedingungen.	20

Abbildungen

Abbildung 1-1:	Doppelfedermodell als in Reihe geschaltete Federn nach Schuppener et al. [12]	1
Abbildung 1-2:	Stoßkraftzeitverlauf für Binnenschiffe nach DIN 1055-9 [2]	2
Abbildung 2-1:	Zusammenhang zwischen Erddruck und Wandbewegung	6
Abbildung 2-2:	Fiktive Kraft-Weg-Beziehung für das Eindringen eines Schiffskörpers	6
Abbildung 2-3:	Beispiel einer berechneten Kraft-Weg-Beziehung	7
Abbildung 2-4:	Durch eine Polynomfunktion angenäherte Kraft-Weg-Beziehung.	7
Abbildung 2-5:	Beispielhafte graphische Darstellung der Lösung der Bewegungsgleichung	8
Abbildung 2-6:	Durch Polynome angenäherte graphische Lösung der Bewegungsgleichung	9
Abbildung 3-1:	Abmessungen und Form des Wulstbuges des gewählten Schiffes	11
Abbildung 3-2:	Prinzip des Böschungsanpralls, Detail siehe Abbildung 3-3	12
Abbildung 3-3:	Geometrische Größen beim Eindringen des Schiffbugs in die Böschung.	12
Abbildung 3-4	Das dem Berechnungsmodell zugrunde liegende FE-Netz für die charakteristische Uferböschung einschließlich einer Detaildarstellung des Krafteinleitungspunktes	13
Abbildung 3-5	Ergebnisse der statischen FEM-Berechnung mit dem in Abbildung 3-4 dargestellten Berechnungsmodell	14
Abbildung 3-6:	Eindringtiefen bei 7 Grad Böschungsneigung für unterschiedlich dicht gelagerte Sande	15

Literatur

- [1] Denver, H. (1983) Design of protective islands by means of geotechnical model tests. paper des IABSE Colloquiums: Ship Collision with Bridges and Offshore Structures, Copenhagen 1983
- [2] DIN 1055-9 (2003) Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 9: Außergewöhnliche Einwirkungen, Abschnitt 6.5 Anprall von Schiffen, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [3] EN 1991-1-7-2005 (D): Euronorm, Kap. S. 64, Kapitel C.4.4 Weitergehende Anpralluntersuchung für Schiffe auf Seewasserstraßen
- [4] Germanischer Lloyd (1995) Kraft-Verformungskennlinien bei streifenden Schiffsstößen auf eine starre Wand Bericht S-2364/b-94, Germanischer Lloyd, Hamburg
- [5] Germanischer Lloyd (1995) Kraft-Verformungskennlinien von Bugstrukturen, Bericht S - 2364 - 94, Germanischer Lloyd, Hamburg
- [6] Henschke, W. (Hrsg.) (1957) Schiffbautechnisches Handbuch, Band 1, Kap. 1.86, Hydrodynamische Massen und hydrodynamische Trägheitsmomente, S. 260 - 269, VEB Verlag Technik Berlin
- [7] Kramer, H: (2004) Pfeilersicherung durch Unterwasser-Steinböschungen an der NOK-Eisenbahnbrücke Hochdonn, Vortrag BAW Hamburg, 13. Mai 2004
- [8] Kunz, Claus (1993) Beurteilung der Sicherheit von Brücken hinsichtlich von Schiffskollisionen, In: Binnenschifffahrt, Nr. 6, März, S. 18 - 22
- [9] Larsen, Damgaard Ole (1993) Vessel Impact Forces, In: Ship Collision with Bridges - The Interaction between Vessel Traffic and Bridge Structures, International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), Zürich, Switzerland, Chap. 6, p. 53 - 76
- [10] Meier-Dörnberg, K. E. (1983) Schiffskollisionen, Sicherheitszonen und Lastannahmen für Bauwerke der Binnenwasserstraßen, In: Der Sicherheitsnachweis für mechanische Strukturen unter transientser Belastung - Tagung Darmstadt, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, VDI-Berichte Nr. 496, S. 1 - 9
- [11] Reich, m. Röhr. U. (2005) Zur Dynamik der Strandung von Schiffen - Bewegungsgleichungen und Rechenmodell, In: Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft (STG), Hamburg 2005 (zurzeit in Druck)
- [12] Schuppener, B., Kauther, R, Kramer H., Vorbau, J.: Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Technische Universität Berlin, Heft Nr. 38, Berlin 2005, S. 79 - 102, Vorträge zum 1. Hans Lorenz Symposium
- [13] Schuppener, Bernd (2005) Abschätzung des Bremsweges für ein Schiff mit Pontonbug bei senkrechter Anfahrt und Aufgleiten auf eine Böschung - private Mitteilung

Weiterführende Arbeiten

- [14] Glykas, A., Das, P.K. (2001): Application of Failure and Fracture Criteria during a Tanker Head-on Collision, In: Ocean Engineering 28, S. 375 - 395
- [15] Glykas, A., Das, P.K. (2001): Energy Conservation during Grounding with Rigid Slopes, In: Ocean Engineering 28, S. 397 - 415
- [16] Simonson, B.C. (1997) Mechanics of Ship Grounding, PhD-Thesis, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Technical University of Denmark, Uilding
- [17] Shengming Zhang. (2002): Plate tearing and bottom damage in ship grounding, In: Marine Structures, Vol. 15, pp.101 - 117
- [18] K. K. Tikka, Y. J. Chen. (2001): Prediction of Structural Response in Grounding - Application to Structural Design, SSC 2001.
- [19] Glykas, A. and Das, P.K. (2001): Energy conservation during grounding with rigid slopes, In: Ocean Engineering, Vol 28, pp.397 - 415
- [20] Qi En-rong, CUI Wei-cheng. (2001): A State of the Art Review on ship Collision and Grounding, In: Journal of Ship Mechanics, Vol.5, No.4
- [21] J. Kajaste-Rudnitski and P. Kujala. (2001): FE Approach to the Ship Grounding Event, International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE' 2001), pp. 378
- [22] Soding, Heinrich (2001): Life span of ships in soaking, (in deutsch) International Maritime Journal, pp. 31 - 38
- [23] P. Terndrup Pedersen, Shengming Zhang. (2000) Effect of ship structure and size on grounding and collision damage distributions, In: Ocean Engineering, Vol 27, pp.1161 - 1179
- [24] Brown, A., Tikka, K., Daidola, J.C., Lutzen, m. and Choe, I.H. (2000) Structural design and response in collision and grounding, The 2000 SNAME Annual Meeting, Vancouver, October
- [25] Wang G., Arita K. and Liu D. (2000): Behavior of a double hull in a variety of stranding or collision scenarios, In: Marine Structures, Vol. 13, pp.147 - 187
- [26] Pedersen, P.T. and Zhang, S. (2000): Absorbed energy in ship collisions and grounding- Revising Minorsky's empirical method, In: Journal of Ship Research, Vol.44, No.2, June, pp.140 - 154
- [27] Philip J. Bart, John B. Anderson. (2000): Relative temporal stability of the Antarctic ice sheets during the late Neogene based on the minimum frequency of outer shelf grounding events, In: Earth and Planetary Science Letters Vol 182, pp.259 - 272

- [28] J.K. Paik et al. (1999): Experimental Investigation of Structural Crashworthiness in Ship Collision and Grounding Using Double Skinned Structural Models, In: KSSC Transactions, The Korea Ship and Offshore Structures Congress, Vol.13, No.1,1999, pp.85 - 99
- [29] Qi En-rong, Cui Wei-cheng, Peng Xingning, Xu Xiangdong. (1999): The Reliability Assessment of Ship Residual Strength after Collision and Grounding, In: Journal of Ship Mechanics, Vol.3, No.5
- [30] Steven P. McGee, Armin Troesch, and Nickolas Vlahopoulos. (1999). Damage Length Predictor for High-Speed Craft, In: Marine Technology, Vol.36, No.4, pp.203 - 210
- [31] M. m. Littler, D. S. Littler. (1999) Disturbances due to Cyclone Gavin parallel those caused by ship grounding, In: Coral Reefs, Vol 18, pp.146
- [32] J.K. Paik, A.K. Thayamballi and S.H. Yang. (1998): Residual Strength Assessment of Ships after Collision and Grounding, In: Marine Technology, Vol.35, No.1, pp.38 - 54, 1998.
- [33] Bo Cerup Simonsen. (1998): Ship Grounding on Rock-I. Theory, In: Marine Structures, Vol 10, pp.519 - 562
- [34] Bo Cerup Simonsen. (1998): Ship Grounding on Rock-II. Validation and Application. In: Marine Structures, Vol 10, pp.563 - 584
- [35] Eike Lehmann, Jorg Peschmann, Alexander Kulzep. (1997): Grounding of Ships, (In German), In: Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, Band 91.
- [36] J.K. Paik and P.T. Pedersen. (1997): Simple Assessment of Post-Grounding Loads and Strength of Ships, International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 141 - 145, 1997
- [37] Sung Kyou Choi and Jae Hyung Park, Tomasz Wierzbicki. (1997): Assessment of Grounding Resistance of Oil Tankers, Proceedings of the Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE'97), Vol.IV, Honolulu, pp.410 - 415, May 1997
- [38] Kuroiwa, Takao Kusuba. (1997): Study on the Structural Toughness Against Bottom Raking Due to Grounding, In: OMAE 1997 Ocean space unilization
- [39] J.K. Paik and T.K. Lee. (1995): Structural Damage and Residual Strength of Ships in Grounding with a Forward Speed, In: Transactions of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 32, No. 4, pp. 73 - 86, November 1995
- [40] J.K. Paik and Tak K. Lee. (1995): Damage and Residual Strength of Double Hull Tankers in Grounding, In: International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 5, No. 4, pp. 286 - 295, December 1995
- [41] Jerome P. Sikora, Robert W. Michaelson, Donald P. Roseman, Raymond H. Juers, William m. Melton. (1995): Double Hull Tanker Research: Further Studies, In: The 1995 SNAME, Vol 103, pp. 295 - 320

- [42] Pedersen, P.T. and Simonsen, B.C. (1995): Dynamics of ships running aground, In: Journal of Marine Science and Technology, Vol.1, No.1, pp.37 - 45
- [43] J.K. Paik, Myung H. Hyun and Tak K. Lee. (1994): On the Grounding Damage of Ship Bottom Stiffened Platings (Part I: Experiment), In: Transactions of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 31, No. 1, pp. 121 - 132, February 1994
- [44] J.K. Paik and Tak K. Lee. (1994): On the Grounding Damage of Ship Bottom Stiffened Platings (Part II: Damage Prediction Formula), In: Transactions of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 31, No. 4, pp. 119 - 129, November 1994
- [45] Pedersen, P.T. (1994): Ship grounding and hull-girder strength; In: Marine Structures, Vol. 7, pp. 1 - 29
- [46] http://ssml.naoe.pusan.ac.kr/issc/ref/full_paper/3-index.htm

1 Literaturrecherche

Die verfügbare Literatur besteht im Wesentlichen zu Untersuchungen zum Schiffsstoß von Binnenschiffen. Nur im Eurocode und den Berichten des Germanischen Lloyd wird auf Seeschiffe eingegangen. Dennoch sollen an dieser Stelle wichtige Arbeiten zitiert werden, da sie das physikalische Prinzip der Stoßbetrachtung gut veranschaulichen und Hinweise für die detaillierte Betrachtung des Böschungsanpralls von Seeschiffen liefern.

1.1 Schiffsanprall von Binnenschiffen

Bereits 1983 wurden von MEYER-DÖRNBERG [10] erste theoretische Grundlagen für die Bemessung von Schiffsstößen gelegt. In seiner grundlegenden Arbeit wird auch auf Experimente und die Auswertung von realen Szenarien eingegangen. Die Untersuchungen werden für Europa-Leichter mit Pontonbug durchgeführt.

Einer ähnlichen Fragestellung wie die des Schiffsanpralls auf Böschungen gehen KRAMER et al. [7] bei ihrem Vortrag im Mai 2004 bei der BAW in Hamburg nach. Dabei geht es um die „Pfeilersicherung durch Unterwasser-Steinböschungen an der NOK-Eisenbahnbrücke Hochdonn.“ Dabei sollen die kanalseitigen Pfeiler der über 100 Jahre alten Eisenbahnhochbrücke Hochdonn gegenüber Schiffskollision gesichert werden. Mit Hilfe eines dreidimensionalen grafischen Programms und einer numerischen Abschätzung wird beurteilt, ob die Sicherung durch eine Unterwasser-Steinböschung ausreicht. Die Vorgehensweise und die Ergebnisse von Modellrechnungen werden erläutert.

Der weitere Projektfortgang dieses Vorhabens wurde im Oktober 2005 in Berlin von SCHUPPENER et al. [12] vorgestellt. Dabei wird detailliert der Schiffsstoß auf Böschungen behandelt. Es wird neben der Böschungsverformung auch eine Verformung des Schiffskörpers angenommen und zum Teil auch berechnet.

Grundlage ist dabei das Doppelfedermodell, welches in Abbildung 1-1 dargestellt ist.

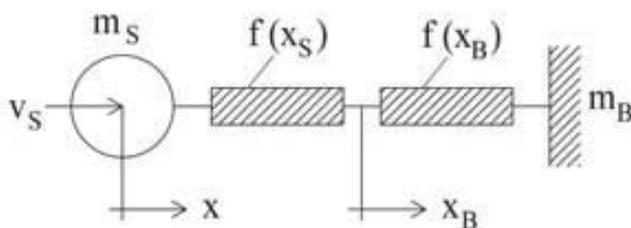


Abbildung 1-1: Doppelfedermodell als in Reihe geschaltete Federn nach Schuppener et al. [12]

Allerdings erfolgen die Ausführungen nur für Binnenschiffe und Binnenwasserstraßen. Diese Überlegungen lassen sich nur sehr bedingt auf Seewasserschiffe und -straßen übertragen.

In der DIN 1055-9 [2], Abschnitt 6.5, wird der Anprall von (Binnen-)Schiffen auf Tragwerke behandelt. Dabei wird auf die Ermittlung der Stoßlast, auf die das betroffene Bauwerk zu bemessen ist, detailliert eingegangen. Es wird vorausgesetzt, dass das gestoßene Tragwerk gegenüber der Einwirkung als starr betrachtet werden kann. Die gesamte Aufprallenergie wird dabei in Deformationsenergie des Schiffes umgewandelt.

Die dynamische Stoßlast F_{dyn} in MN berechnet sich danach zu:

- $F_{dyn} = 10,95 \cdot \sqrt{E_{def}}$ für E_{def} kleiner gleich 0,21 MNm für elastischen Stoß,
- $F_{dyn} = 5,0 \cdot \sqrt{1 + 0,128 \cdot E_{def}}$ für E_{def} größer 0,21 MNm für plastischen Stoß.

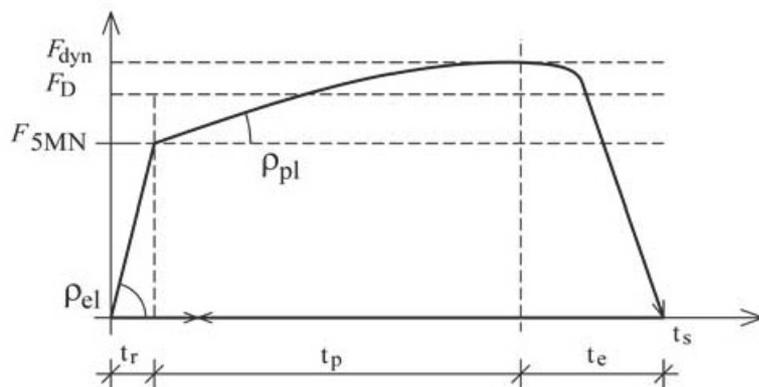


Abbildung 1-2: Stoßkraftzeitverlauf für Binnenschiffe nach DIN 1055-9 [2]

Die Umrechnung in statische Lasten kann mit einem Faktor von 1,3 bzw. 1,7 - je nach genauer dynamischer Stoßlast - erfolgen.

Zur Berechnung der Verformung des Schiffsbugs ist allerdings die Umrechnung in den Stoßkraft-Weg-Verlauf notwendig. SCHUPPENER et al. [12] geben hierfür eine Näherungslösung an. Auch werden dort die Neigungswinkel ρ_{el} und ρ_{pl} angegeben.

Der Eurocode 1991-1 [11] erweitert die Angaben der DIN 1055-9 auf Seeschiffe, bezogen auf die dynamische Anpralllast.

1.2 Weiterführende Arbeiten

In der Arbeit von LARSEN [9] wird im Wesentlichen der Schaden am Schiff bei einer Kollision mit einem Brückenpfeiler beschrieben. Dort werden auch Versuche von *Woisin* aufgeführt, welche in der Zeit von 1967 - 1976 an der GKSS in Geesthacht durchgeführt wurden. Ziel der Arbeiten war allerdings die Untersuchung der Schäden an Schiffen und die Festlegung der Bemessungslast für gefährdete Brücken. Dabei sollte sichergestellt werden, dass auch für durch Kernkraft betriebene Schiffe keine Freisetzungsgefahr von radioaktivem Material bestand.

Die beiden Berichte des GERMANISCHEN LLOYD [4] und [5] gehen auf die Kraft-Verformungskennlinien von Bugstrukturen ein. Dabei wird der Anprall auf eine steife Wand betrachtet.

Die oben in diesem Abschnitt genannten Arbeiten [4], [5] und [9] sind dann von Bedeutung, wenn Annahme 1 aus Abschnitt 2.1 als die Annahme der Nichtverformung des Schiffsbugs bei der Kollision mit der Flusssohle fallen gelassen wird. Dies könnte in weiterführenden Betrachtungen geschehen.

1.3 Schiffsanprall als Risikoabschätzung

Weitere Arbeiten, z. B. KUNZ [8], und auch Abschnitte schon angesprochener Ausführungen, z. B. [2], betrachten den Schiffsanprall als eine Risikoabschätzung. Dabei wird die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Ereignisses im Verhältnis zu dem zu schützenden Gut betrachtet. Nach Festlegung einer relativen Sicherheit kann anschließend ein kostenoptimiertes Entscheidungskriterium für bestimmte Schutzmaßnahmen festgelegt werden.

1.4 Begriffe

Unter **Eindringtiefe** soll im Rahmen dieser Ausführungen der maximale Eindringabstand des Schiffskörpers *senkrecht* zur Böschungsoberfläche verstanden werden.

Der **horizontale Eindringweg** ist der Weg, den das Schiff bis zum Stillstand parallel zur Wasseroberfläche von der Grundberührung beginnend noch zurücklegt.

Siehe zur Erläuterung dieser beiden Begriffe auch Abbildung 3-3 auf Seite 12.

Die **Eindringbeeinflussung** ist der Bereich des Bodens, in dem es zu zusätzlichen Spannungsbelastungen durch die Böschungsdeformation des Anpralls kommt.

2 Vereinfachtes Modell von IMS

Auf Grundlage der durchgeführten Literatursichtung wurde von IMS ein eigenes einfaches Modell zur überschlägigen Abschätzung der Eindringtiefe von Seeschiffen bei Böschungsanprall entwickelt, welches im Folgenden vorgestellt wird.

2.1 Annahmen

Folgende Annahmen werden für das vereinfachte Modell getroffen:

1. Der Schiffsrumpf wird als starrer Körper angesehen. Durch den Anprall kommt es zu keinerlei Verformungen am Schiff.
2. Hydrodynamische Strömungskräfte werden vernachlässigt.
3. Hydrodynamische Dämpfungskräfte werden vernachlässigt.
4. Bei den auf das Schiff wirkenden Trägheitskräften werden die hydrodynamischen Massen nicht berücksichtigt.
5. Windkräfte werden vernachlässigt.
6. Es wird nur die translatorische Bewegung des Schiffes betrachtet. Ggf. auftretende Drehbewegungen werden vernachlässigt.
7. Das leichte Anheben des Schiffes beim Auffahren auf eine Böschung wird vernachlässigt.

Die erste Annahme vernachlässigt die Energie, welche durch den Schiffsrumpf absorbiert wird. Daher trägt dieser Energieanteil zusätzlich zum Eindringen des Schiffskörpers bei. Die Annahme liegt somit auf der sicheren Seite, da damit die Eindringtiefe überschätzt wird.

Detaillierte Ausführungen zu den Annahmen 2, 3 und 4 sind in HENSCHKE [6] zu finden. Da es sich bei dem einfachen Modell um Abschätzungen handelt, ist eine detaillierte Betrachtung dieser zusätzlichen Effekte nicht zwingend notwendig. Die Vernachlässigung der hydrodynamischen Masse liegt nach [6] auf der sicheren Seite für das Berechnen der Eindringtiefe, da sie dem Abbremsen des Schiffes zusätzlichen Widerstand entgegen stellen würde.

Windkräfte würden zu einer Verdrehung des Schiffes beitragen und die Eindringkraft reduzieren. Insofern liegen auch die Annahmen 5 und 6 auf der sicheren Seite.

Über das genaue Anheben des Schiffes beim Böschungsanprall kann keine Aussage gemacht werden. Eine Vernachlässigung der dadurch auftretenden potentiellen Energie des Schiffskörpers liegt ebenfalls auf der sicheren Seite, da die

eigentlich auftretende potentielle Energie des Schiffes als Verformungsenergie der Sohle berücksichtigt und somit die Eindringtiefe geringfügig überschätzt wird.

Die getroffenen Vereinfachungen zur Berechnung der Eindringtiefe bei der Böschungsverformung durch Schiffsanprall liegen somit alle auf der sicheren Seite .

2.2 Berechnungsmodell

Zur Bestimmung der maximalen Eindringtiefe wird die Bewegungsgleichung des Schiffes in Längsrichtung x

$$m \cdot \ddot{x}(t) = F(x[t]) \quad (1)$$

näherungsweise gelöst. Die Größe $\ddot{x}(t)$ stellt dabei die zweite Ableitung des Ortes nach der Zeit dar. $F(x[t])$ ist die beim Eindringen des Schiffsrumpfes auf den Schiffskörper wirkende wegababhängige Kraft, wobei der Weg x eine Funktion der Zeit t ist.

Zur Ermittlung dieser Kraft in Abhängigkeit des Eindringweges x muss zunächst ein bodenmechanisches Modell erstellt werden. Siehe hierzu die Ausführungen in Abschnitt 3.3 „Darlegung der bodenphysikalischen Berechnungen“. Die Grundlage dafür bildet eine vereinfachte Geometrie eines Wulstbugs nach Abbildung 3-1.

Die Verformung der Sohle wird sich dabei an Abbildung 2-1, welche [12] entnommen ist, anlehnen.

Die Bewegungsgleichung kann nun numerisch integriert werden. Anschließend kann das aus der Funktion $x(t)$ folgende Maximum des Eindringweges in Abhängigkeit der Anfangsgeschwindigkeit und der Masse m des Schiffes berechnet werden. Dabei handelt es sich um die Lösung eines Anfangswertproblems, d.h. es wird eine Integration im Zeitbereich durchgeführt.

Alternativ kann eine Energiebetrachtung durchgeführt werden. Dabei werden die kinetische Energie des Schiffes vor dem Anprall und die Verformungsenergie der Flusssohle gleichgesetzt.

Hierbei könnte auch eine plausible Annahme über die Anhebung des Schiffes durch den Aufprall berücksichtigt werden. Siehe hierzu Abschnitt 2.3.5 „Energieansatz“.

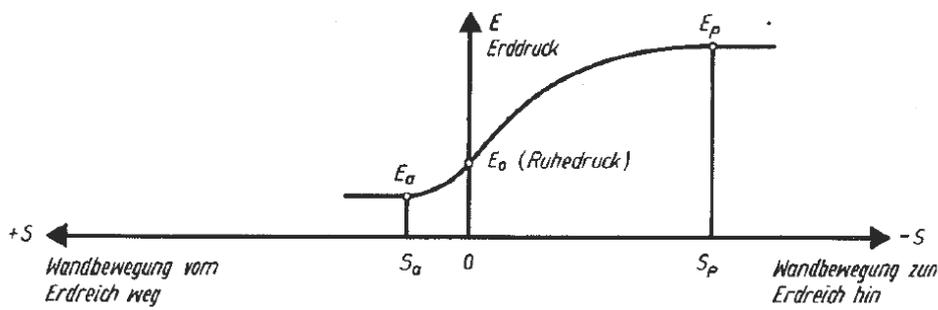


Abbildung 2-1: Zusammenhang zwischen Erddruck und Wandbewegung

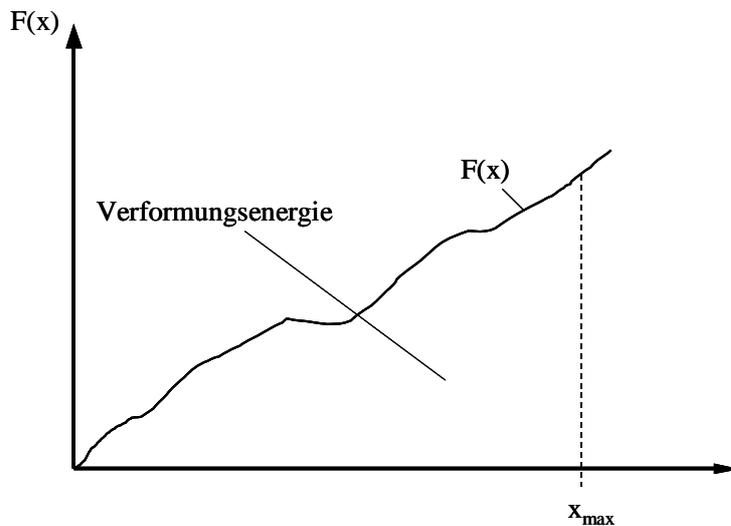


Abbildung 2-2: Fiktive Kraft-Weg-Beziehung für das Eindringen eines Schiffskörpers

Die Verformungsenergie kann mit Hilfe der Abbildung 2-2 bestimmt werden. Dabei wird die angenommene Stoßkraft in Abhängigkeit des Weges integriert. Damit ergibt sich die Verformungsenergie als Fläche unter der entsprechenden Kurve.

2.3 Lösung der Bewegungsgleichung

2.3.1 Erstellen der Kraft Weg Beziehung und ihre näherungsweise Beschreibung durch eine Polynomfunktion

Mit Hilfe bodenmechanischer Überlegungen wird eine Kraft-Weg-Beziehung bei Eindringen einer Schiffsspitze in den Flussboden erstellt. Diese könnte z.B. folgende Form haben:

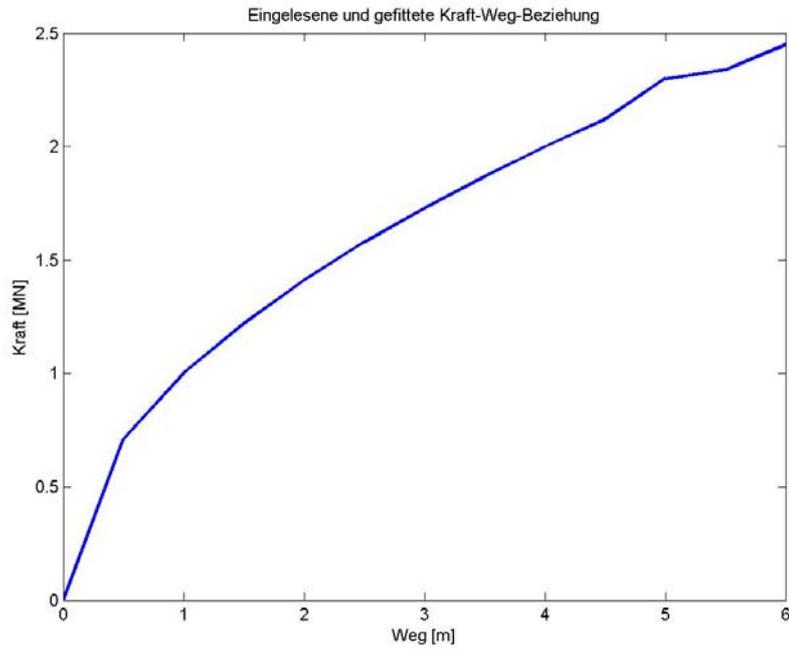


Abbildung 2-3: Beispiel einer berechneten Kraft-Weg-Beziehung

Die durch Wertepaare bestimmte Kurve wird durch eine Polynomfunktion angenähert:

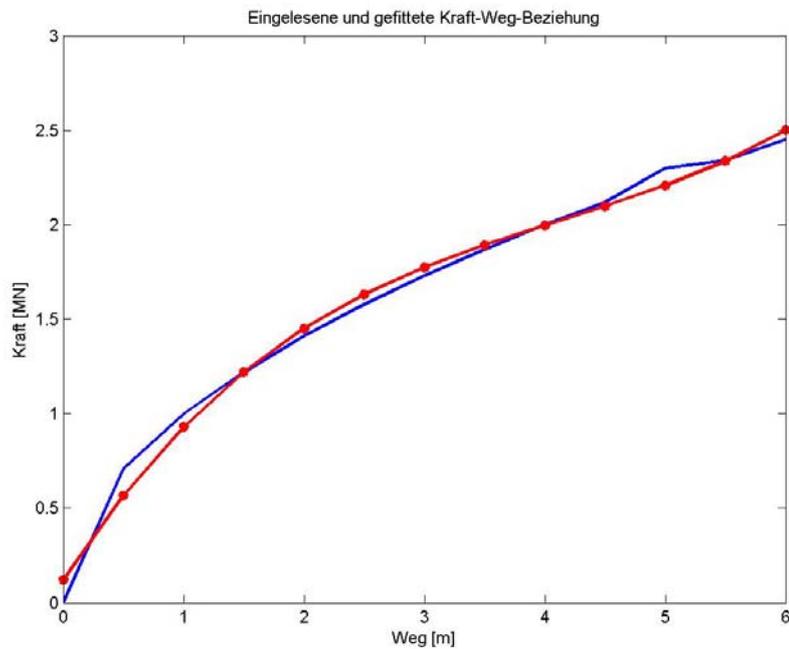


Abbildung 2-4: Durch eine Polynomfunktion angenäherte Kraft-Weg-Beziehung. Der Graph mit den Punkten stellt das berechnete Polynom dar.

2.3.2 Aufstellen der Differentialgleichung mit Hilfe der gefundenen Kraft-Weg-Beziehung

Das gefundene Polynom der Kraft-Weg-Beziehung werde mit F_p bezeichnet. Dann ist folgende Differentialgleichung als Bewegungsgleichung zu lösen:

$$m \cdot \ddot{x}(t) = F_p(x[t]). \quad (2)$$

2.3.3 Lösen der Differentialgleichung

Die aufgestellte Differentialgleichung wird numerisch nach dem Runge-Kutta-Verfahren gelöst. Dabei sind als Randbedingungen, der Ort $x = 0$ zur Zeit $t = 0$ und die Schiffsgeschwindigkeit v_0 zum Zeitpunkt $t = 0$, also unmittelbar vor dem Aufprall, vorzugeben.

Die Lösung kann z. B. graphisch wie in Abbildung 2-5 dargestellt werden.

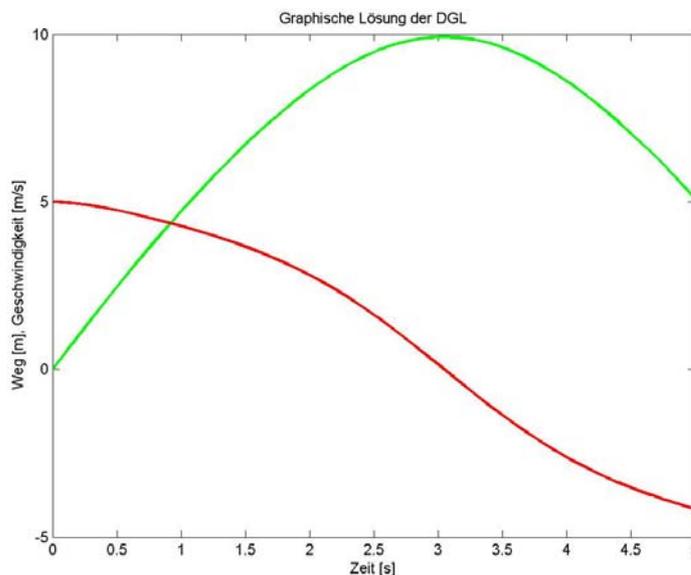


Abbildung 2-5: Beispielhafte graphische Darstellung der Lösung der Bewegungsgleichung

Die bei 0 m beginnende obere Kurve entspricht dem Weg, die bei 5 m/s beginnende untere Kurve entspricht der Geschwindigkeit

Zur besseren Bestimmung der Extremwerte und der gesuchten Nullstellen werden auch diese beiden Lösungsfunktionen durch Polynome angenähert.

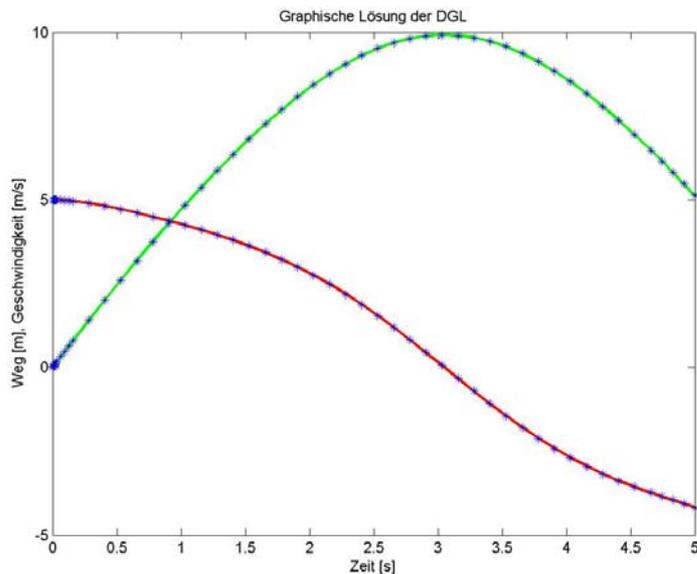


Abbildung 2-6: Durch Polynome angenäherte graphische Lösung der Bewegungsgleichung

Anmerkung: Im betrachteten Modell wirkt eine mit größer werdender Eindringtiefe nichtlinear wachsende Kraft. Da diese Kraft mit wachsendem Weg immer weiter wächst, kommt der betrachtete Körper, in diesem Fall das Schiff, nach kurzer Zeit zum Stillstand. Der senkrechte Anteil des bis dahin zurückgelegten Weges ist die gesuchte Eindringtiefe in die Böschung (siehe auch Abbildung 3-3).

Physikalisch bewirkt die angenommene Kraft eine symmetrische Rückwärtsbewegung bis zum Nullpunkt, also dem Ort der Berührung. Dieser zweite Teil des Vorganges ist hier aber nicht von Bedeutung, verdeutlicht aber die Verwandtschaft des Modells zur *Schwingungsgleichung*.

2.3.4 Extremwertsuche der gefundenen Lösungsfunktionen

Für die gefundene Lösungsfunktion der Geschwindigkeit v_p wird nun die Nullstelle bestimmt. Zu diesem gesuchten Zeitpunkt liegt die maximale Eindringtiefe des Schiffes in den Boden vor. Zur bestimmten Zeit t_0 wird daher der Wert des Weges $x(t_0)$ bestimmt. Der senkrechte Anteil dieses Weges ist die gesuchte Eindringtiefe des Schiffes in die Flusssohle.

2.3.5 Energieansatz

Das Polynom, welches die Kraft-Weg-Beziehung annähert, z. B. nach Abbildung 2-4, kann sofort elementar integriert werden. Damit ergibt sich die verrichtete Arbeit am Erdkörper in Abhängigkeit der Eindringtiefe des Schiffes. Diese verrichtete Arbeit entspricht der kinetischen Energie des Schiffes unmittelbar vor der Grundberührung, abzüglich eines Anteils an anzunehmender po-

tentieller Energie durch das leichte Anheben des Schiffes, der Verformungsenergie des Schiffes und der entstehenden Wärme.

Diese abzüglichen Anteile sollen im Rahmen dieses einfachen Modells vernachlässigt werden. Sie bedürften einer aufwändigeren Analyse, welche nicht Gegenstand dieser Überlegungen sein kann.

Wird das Polynom, das die Kraft-Weg-Beziehung annähert, integriert und die entsprechende Stammfunktion mit FS_p bezeichnet, so folgt für den Energiesatz:

$$0 = FS_p(x_{\max}) - m \cdot \frac{v^2}{2}. \quad (3)$$

Die Nullstellen dieser Gleichung können z. B. numerisch bestimmt werden. Unter den eventuell mehrfachen Lösungen ist die entsprechend physikalisch sinnvolle auszuwählen. Der senkrechte Anteil des gefundenen Wertes x_{\max} entspricht der gesuchten Eindringtiefe nach dem Energieprinzip.

Unter Annahme der Gültigkeit der vorgenommenen Vereinfachungen ergeben sich nach Energiesatz und Impulsansatz die gleichen Ergebnisse, was auch durch die Rechnung bestätigt wird.

Anmerkung: Die potentielle Energie ließe sich durch einen einfachen Ansatz berücksichtigen. Dazu müsste der potentielle Anteil in die obige Energiegleichung eingefügt werden:

$$0 = FS_p(x_{\max}) - m \cdot \frac{v^2}{2} + g \cdot m \cdot \Delta z. \quad (4)$$

Nun kann der Term der potentiellen Energie durch einen Anteil der kinetischen Energie ersetzt werden. Entspricht dieser Anteil z. B. 10 %, so folgt

$$0 = FS_p(x_{\max}) - 0,9 \cdot m \cdot \frac{v^2}{2}, \quad (5)$$

und es müsste von dieser Gleichung die entsprechende Nullstelle gefunden werden. Da aber keine Angaben über den Anteil der potentiellen Energie verfügbar sind, soll - wie oben bereits angesprochen - dieser Teil vernachlässigt werden.

3 Berechnungen

Zur Berechnung der Eindringtiefe mit Hilfe des von IMS entwickelten und in Kapitel 2 vorgestellten Modells wurde mit dem Programmsystems MATLAB (Version 7.14) ein entsprechender Lösungsalgorithmus programmiert und die hier vorgestellten Ergebnisse mit diesem Programm berechnet.

3.1 Annahmen

Das in Abschnitt 2 vorgestellte Modell soll nun auf verschiedene Testfälle angewendet und dabei folgendes Musterschiff verwendet werden:

Schiffstyp:	Containerschiff
Breite:	45,00 m
verdrängte Masse:	150.000 t
Neigung des Wulstbuges:	15 Grad
Wulstbugbreite:	6,00 m
Wulstbughöhe:	14,50 m
Länge des Wulstbugs:	20,00 m.

Die angenommene Wulstbugform ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

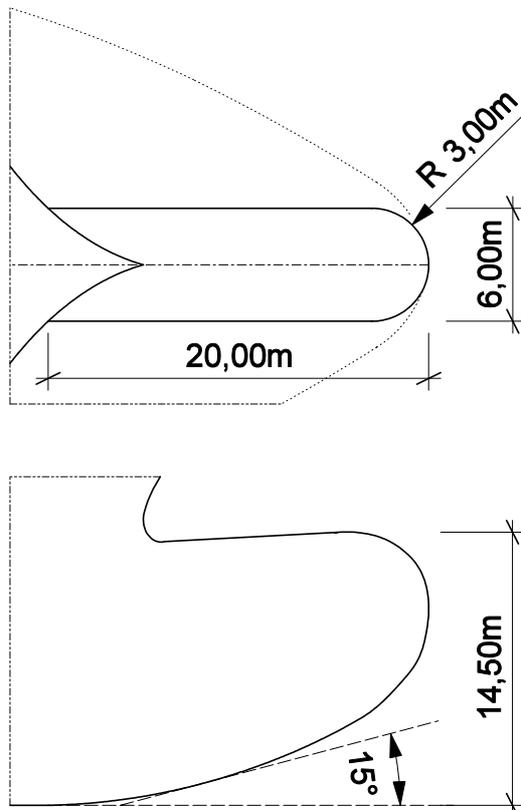


Abbildung 3-1: Abmessungen und Form des Wulstbuges des gewählten Schiffes

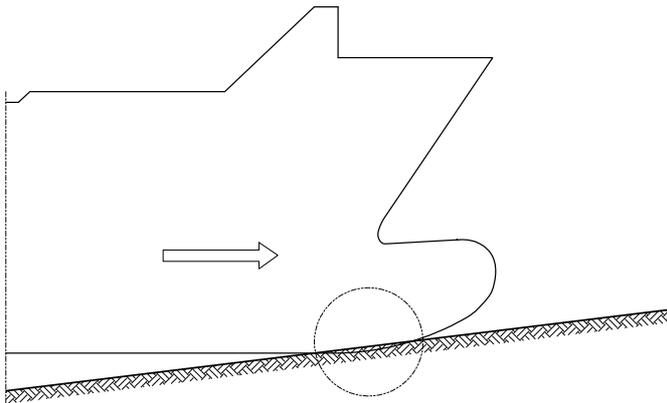


Abbildung 3-2: Prinzip des Böschungsanpralls, Detail siehe Abbildung 3-3

Abbildung 3-3 zeigt die zu ermittelnden geometrischen Größen beim Schiffsanprall auf eine Uferböschung.

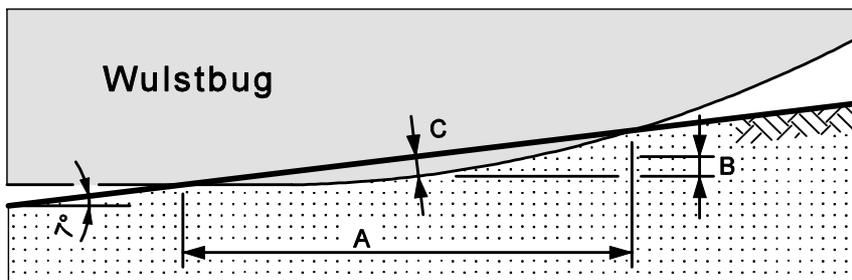


Abbildung 3-3: Geometrische Größen beim Eindringen des Schiffsbugs in die Böschung. Die Größe A entspricht dem horizontalen Eindringweg und der Wert von C der zum Böschungsverlauf senkrechten Eindringtiefe.

3.2 Baugrund und Böschungsneigung

3.2.1 Baugrund

Als charakteristischer Baugrund werden drei verschiedene nicht bindige Sandböden verwendet, die sich in ihrer Lagerungsdichte und inneren Scherfestigkeit unterscheiden. In der nachfolgenden Tabelle sind die zugrunde gelegten bodenmechanischen Rechenwerte der Bodenkenngrößen für die drei nicht bindigen Böden zusammengefasst.

Tabelle 3-1: Rechenwerte der bodenmechanischen Kenngrößen im Böschungsbereich

Parameter	Einheit	locker gelagert	mitteldicht gelagert	dicht gelagert
$E_{50} = E_{Oed}$	kN/m ²	20.000	30.000	40.000
E_{ur}	kN/m ²	60.000	90.000	120.000
Kohäsion c	kN/m ²	0	0	0
Reibungswinkel φ	°	32,5	35	40
Dilatanzwinkel ψ	°	2,5	5	10
Poissonzahl ν	-	0,20	0,20	0,20

3.2.2 Böschungsneigung

Es wird eine charakteristische, flache Unterwasserböschung im Deichvorland mit einer Neigung von 1 : 8 (entspricht 7 Grad) zugrunde gelegt. (Vergleichsrechnungen wurden auch für eine 15° geneigte Böschung vorgenommen).

Die Berechnungen erfolgten mit dem Finite-Elemente-Programm PLAXIS, Version 8.2. In Abbildung 3-4 ist das generierte Finite-Elemente-Netz dargestellt. Es wurden rund 200 Dreieckselemente mit jeweils 15 Knotenpunkten generiert. Der Schiffsrumpf entspricht den Annahmen in 3.1. Am Fußpunkt des Rumpfes wird die Kraft auf den Schiffkörper zentriert und in die Böschung eingeleitet.

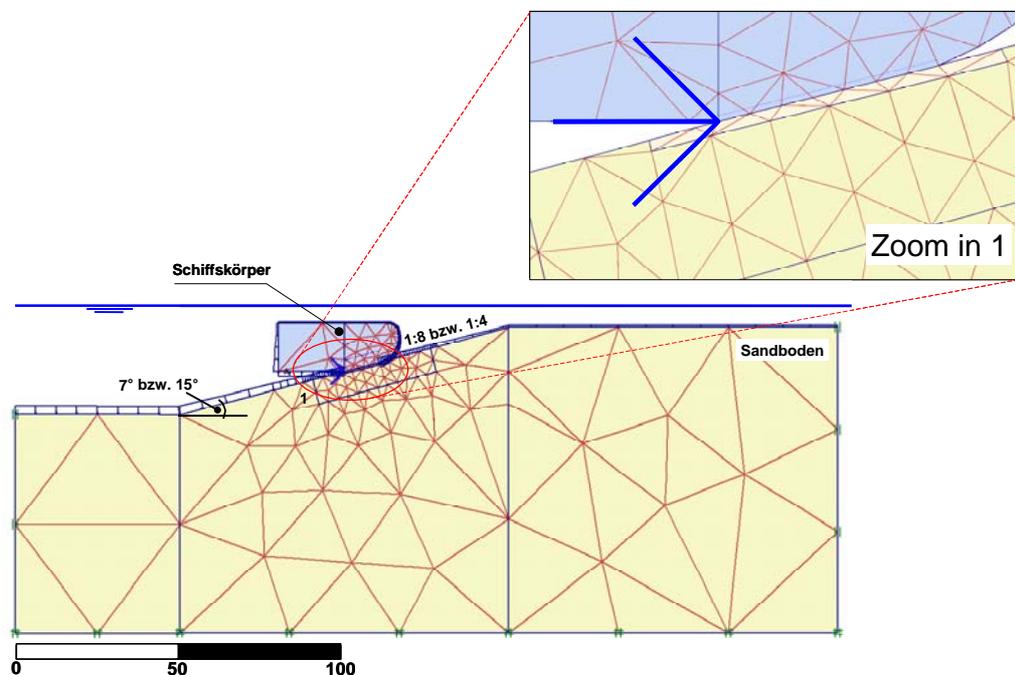


Abbildung 3-4 Das dem Berechnungsmodell zugrunde liegende FE-Netz für die charakteristische Uferböschung einschließlich einer Detaildarstellung des Kräfteinleitungspunktes

Für den nicht bindigen Sandboden der Uferböschung in Abbildung 3-4 wurden die unterschiedlichen bodenmechanischen Kenngrößen nach Tabelle 3-1 angenommen.

In der nachfolgenden Abbildung 3-5 werden die mit dem in Abbildung 3-4 dargestellten Modell ermittelten horizontalen Verformungen (horizontaler Eindringweg A gemäß Abbildung 3-3) der Böschung dargestellt. Es zeigt sich, dass

- sich die Kraft-Verformungslinie annähernd linear verhält,
- eine große Variation bezüglich der aufzubringenden Kraft bei einer definierten Eindringtiefe - in Abhängigkeit der Lagerungsdichte des Bodenmaterials - vorhanden ist.

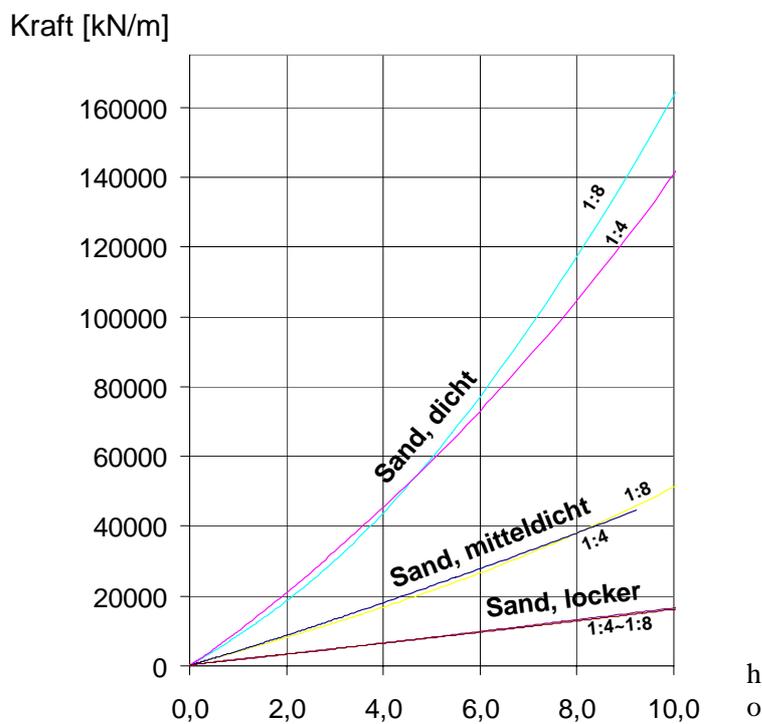


Abbildung 3-5 Ergebnisse der statischen FEM-Berechnung mit dem in Abbildung 3-4 dargestellten Berechnungsmodell

3.3 Darlegung der bodenphysikalischen Berechnungen

Der Eindringweg und die Eindringtiefe wurden für Geschwindigkeiten von 0,2 bis 20 Knoten Schiffsgeschwindigkeit berechnet.

Die mit dem beschriebenen Modell berechneten Ergebnisse sind in Abbildung 3-6 und Tabelle 3-2 sowie Tabelle 3-3 dargestellt.

Eindringtiefe eines Schiffes bei Böschungsanprall auf Sand bei 7 Grad Böschungsneigung

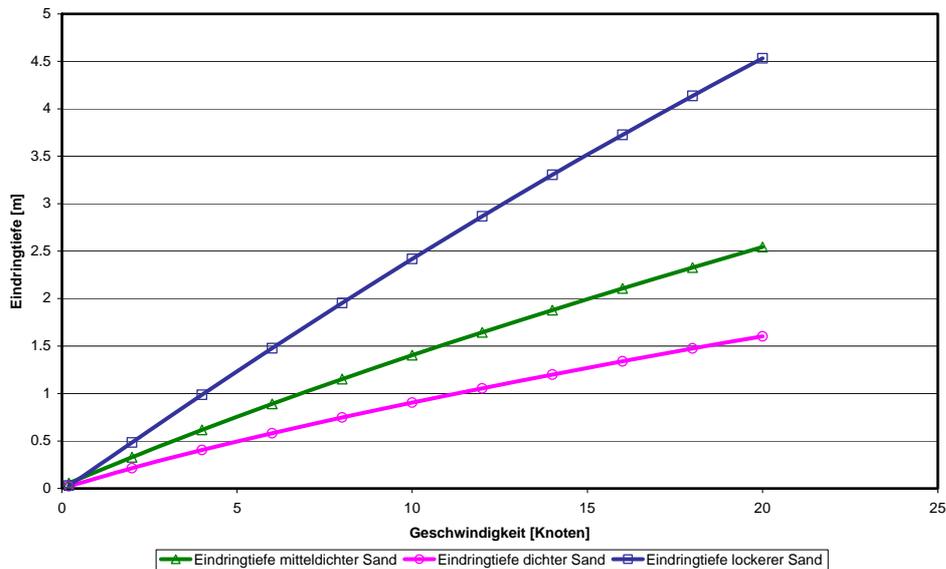


Abbildung 3-6: Eindringtiefen bei 7 Grad Böschungsneigung für unterschiedlich dicht gelagerte Sande

Es zeigt sich, dass bei einer Böschungsneigung von 7 Grad das Schiff bei dichtem Sand maximal 1,6 m, bei mitteldichtem 2,5 m und bei lockerem Sand 4,5 m tief in den Boden eindringt. Diese Werte können nur unter Berücksichtigung der Modellannahmen aus Kapitel 2.1 interpretiert werden.

Tabelle 3-2: Senkrechte Eindringtiefen für Sande bei 7 Grad Böschungsneigung

v [Knoten]	Sand, locker [m]	Sand, mitteldicht [m]	Sand, dicht [m]
0,2	0,029	0,056	0,022
2	0,484	0,328	0,213
4	0,986	0,617	0,405
6	1,477	0,891	0,581
8	1,954	1,152	0,747
10	2,418	1,403	0,904
12	2,867	1,645	1,054
14	3,304	1,879	1,199
16	3,725	2,107	1,339
18	4,135	2,328	1,475
20	4,532	2,544	1,602

Tabelle 3-3: Horizontaler Eindringweg für Sande bei 7 Grad Böschungsneigung

v [Knoten]	Sand, locker [m]	Sand, mitteldicht [m]	Sand, dicht [m]
0,2	0,240	0,457	0,182
2	3,968	2,694	1,753
4	8,092	5,065	3,324
6	12,116	7,312	4,771
8	16,033	9,456	6,129
10	19,838	11,514	7,417
12	23,530	13,499	8,650
14	27,109	15,421	9,839
16	30,567	17,288	10,989
18	33,928	19,105	12,107
20	37,208	20,879	13,144

3.4 Diskussion der Ergebnisse

Die berechneten Ergebnisse sind unter Berücksichtigung der vereinfachenden Annahmen in Kapitel 2.1 plausibel. Die in Tabelle 3-2 angegebenen Werte stellen das Ergebnis des vorgestellten Modells dar. Keinesfalls dürfen die angegebenen drei Stellen hinter dem Komma als Genauigkeit des Modells interpretiert werden.

Eine Parameterstudie, bei welcher der Einfluss anderer Bugstrukturen, anderer Schiffsmassen, verschiedener Böschungswinkel oder anderer Bodenarten berücksichtigt werden könnte, würde weiteren Aufschluss über die Sensibilität der Eindringtiefe von den entsprechenden Parametern bringen. Diese könnte Gegenstand einer ausführlicheren Studie der Böschungsverformung durch Schiffsanprall sein.

Auf die zusätzlichen Spannungen innerhalb des Bodens unterhalb der Eindringstelle kann im Rahmen des vereinfachten Modells nicht detaillierter eingegangen werden. Die Tiefe der *Eindringbeeinflussung* kann nur im Rahmen weiterführender Überlegungen abgeschätzt werden.

4 Überlegungen zur Eintrittswahrscheinlichkeit

Grundsätzlich ist die Wahrscheinlichkeit einer Böschungsdeformation durch Schiffsanprall an einer Stelle, an der ein Düker die Elbe quert, sehr gering. Einer einfachen Abschätzung dieser Eintrittswahrscheinlichkeit sollen 100 Elbkilometer von Hamburg nach Cuxhaven zu Grunde gelegt werden. Dabei wird von 29 Dükern auf dieser Strecke ausgegangen.

Wird ein Einflussbereich von 5 m je Düker angenommen, so ergibt sich bei je 10 m theoretischer Schadensbreite rechts und links vom Düker eine zu berücksichtigende Schadensbreite von 25 m je Düker. Bei einer statistisch gleichverteilten Trefferwahrscheinlichkeit für alle 29 Dükern ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit p , dass ein Düker bei *einem* betrachteten Schiffsanprall im Einflussbereich getroffen wird von

$$p = \frac{25 \text{ m} \cdot 29}{100.000 \text{ m}} \cdot 100\% = 0,725\% \quad (6)$$

Die Wahrscheinlichkeit des Gegenereignisses¹ p_G beträgt

$$p_G = (1 - p) \cdot 100\% = 0,99275\% \quad (7)$$

Werden 10 Anprallereignisse angesetzt, so folgt für die Wahrscheinlichkeit p_{10} , dass mindestens ein Anprallereignis davon im Bereich eines Dükers stattfindet² $p_{10} = (1 - p_G^{10}) \cdot 100\% = 7,02\%$.

Werden 100 Anprallereignisse betrachte, t so folgt $p_{100} = 51,69\%$. Diese Überlegungen lassen sich in folgender Formel darstellen, wobei p_n die Wahrscheinlichkeit in Prozent dafür ist, dass ein Anprallereignis im Einflussbereich eines Dükers - bei n betrachteten Anprallereignissen - stattfindet:

$$p_n = (1 - p_{Gn}) = [1 - (1 - p)^n] \cdot 100\% \quad (8)$$

Dies ergibt mit Berücksichtigung von Gleichung (6)

$$p_n = \left[1 - \left(1 - \frac{(E_D + 2E_S) \cdot a}{d} \right)^n \right] \cdot 100\% \quad (9)$$

¹ Unter dem *Gegenereignis* ist in diesem Fall das Ereignis, dass bei einem Anprallereignis kein Düker getroffen wird, zu verstehen.

² Mindestens ein Anprallereignis bedeutet in diesem Zusammenhang, dass es auch 2, 3, 4 oder n Anprallereignisse im Bereich eines Dükers sein können. Da zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit auch die Reihenfolge der Anprallereignisse eine Rolle spielt, ist es einfacher, mit dem Gegenereignis zu rechnen, da bei diesem Vorgehen das detaillierte Auflisten denkbarer Reihenfolgen nicht notwendig ist. Zur genauen Herleitung von Formel (9) wird auf eine von U. Teschke verfasste interne Aktennotiz von IMS vom 20. Februar 2006 verwiesen, welche auf Anfrage gerne zugesandt wird.

Dabei bedeuten:

- E_S beeinflusster Deichbereich nach einem Schiffsanprall (Annahme: 10 m)
- E_D Einflussbereich eines Dükers (Annahme: 5 m)
- d Entfernung Hamburg - Cuxhaven auf der Elbe, (Annahme 100.000 m)
- n Anzahl der betrachteten Schiffsanprallereignisse [-]
- a Anzahl der querenden Düker zwischen Hamburg und Cuxhaven (29).

Wie oben gezeigt wurde, ist die Wahrscheinlichkeit eines Havariefalles im Bereich eines Dükers für ein einzeln betrachtetes Havarieereignis sehr klein. Werden jedoch insgesamt 1.000 Havariefälle zu Grunde gelegt, so ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit von 99,93 % für einen Unfall im Bereich eines Dükers.

Tabelle 4-1 stellt die nach (8) bzw. (9) für eine unterschiedliche Anzahl von Anprallereignissen n berechneten Trefferwahrscheinlichkeiten - einschließlich der Wahrscheinlichkeiten für keinen Treffer - dar.

Tabelle 4-1: Eintrittswahrscheinlichkeiten nach Formel (8) bzw. (9)

Ereignisanzahl	Trefferwahrscheinlichkeit [%]	Wahrscheinlichkeit kein Treffer [%]
1	0,725	99,275
10	7,018	92,982
50	30,498	69,502
100	51,695	48,305
500	97,370	2,630
1.000	99,931	0,069

5 Zusammenfassung

Durch den Anprall von Schiffen auf die Böschung außerhalb des Fahrwassers kann es zu Deformationen bis hin zu Erdverschiebungen des Böschungsmaterials kommen. Der hier betrachtete Vorgang des Eindringens eines Schiffskörpers in die Böschung ist sehr vielschichtig und von zahlreichen Parametern abhängig. Von Bedeutung ist dabei die zu erwartende Deformation des Bodens und die dadurch im Boden auftretenden Kräfte bzw. Spannungen. Diese können im Extremfall zur Freilegung und zur direkten Beschädigung eines Dükers führen.

Die Böschungsdeformation durch einen Schiffsanprall ist von folgenden Größen abhängig:

- *Schiffsparameter*
 - * Schiffsform, insbesondere Form des Bugs
 - * Schiffsgröße als verdrängte Wassermasse
 - * Schiffsgeschwindigkeit vor dem Anprall
 - * ggf. Tiefgang
- *Sohleigenschaften*
 - * vorhandene Topographie an der Havariestelle und Dükereigenschaften
 - * Neigungswinkel der Böschung
 - * bodenphysikalische Eigenschaften des Böschungsbodens
- *Ereignisabhängige Parameter*
 - * Richtungswinkel des Anpralls im Verlauf zur steilsten Böschungsneigung
 - * Wasserstand der Elbe zur Havariezeit und ggf. auch danach
 - * ggf. mittlere Strömungsgeschwindigkeit der Elbe zur Havariezeit.

Die gesuchte Eindringtiefe des Schiffes in die Flusssohle kann durch ein vereinfachtes Modell abgeschätzt werden. Hierzu wird durch ein bodenphysikalisches Modell die Kraft-Verformungskennlinie von drei für die Elbe charakteristischen Sohlböden numerisch bestimmt. Mit Hilfe der berechneten wegabhängigen Kraft kann die Bewegungsgleichung des betrachteten Modellschiffes von 150.000 t mit Wulstbug gelöst werden.

Die Lösung liefert den horizontalen Eindringweg in die Uferböschung. Daraus kann die senkrecht zur Oberfläche stehende Eindringtiefe mit Hilfe des Böschungswinkels bestimmt werden. Für drei in der Tideelbe auftretende Sande ergeben sich dabei - in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit - folgende senkrechte Eindringtiefen:

Tabelle 5-1: Senkrechte Eindringtiefen für ein Schiff mit einer verdrängten Masse von 150.000 t für unterschiedliche Sande bei 7 Grad Böschungsneigung nach Lösung der Bewegungsgleichung mit festgewählten Randbedingungen.

v [Knoten]	Sand, locker [m]	Sand, mitteldicht [m]	Sand, dicht [m]
0,2	0,029	0,056	0,022
2	0,484	0,328	0,213
4	0,986	0,617	0,405
6	1,477	0,891	0,581
8	1,954	1,152	0,747
10	2,418	1,403	0,904
12	2,867	1,645	1,054
14	3,304	1,879	1,199
16	3,725	2,107	1,339
18	4,135	2,328	1,475
20	4,532	2,544	1,602

Dabei ist zu beachten, dass sich die Eindringtiefe auf den Beginn des eigentlichen festen Bodens der Flusssohle bezieht. Aufgrund der Vereinfachungen des Modells (siehe hierzu Abschnitt 2.1) liegen die berechneten Werte auf der sicheren Seite. REICH/RÖHR [11] kommen bei ihren Berechnungen zu ähnlichen Ergebnissen, so dass davon ausgegangen werden kann, dass sich die Größenordnung der Abschätzung im richtigen Rahmen bewegt. Natürlich kann diese vereinfachte Abschätzung keine detaillierte Parameterstudie ersetzen. Hierzu wären Variationen der hier als konstant gewählten Parameter notwendig.

Die zusätzlichen Bodenspannungen, welche durch das Eindringen des Schiffskörpers unterhalb der Eindringtiefe im Boden entstehen, wurden im Rahmen des vereinfachten Modells nicht ermittelt. Diese Spannungen und ihre Auswirkungen auf benachbarte Düker könnten in einer detaillierteren Studie untersucht werden.

Hamburg, 21. Februar 2006

IMS Ingenieurgesellschaft mbH

gez. Dr. Teschke

gez. Dr. Geduhn



IMS INGENIEURGESELLSCHAFT MBH

**Zentrale und
Niederlassung Hamburg**
Stadtdeich 5
20097 Hamburg
Tel.: 040 32818-0
Fax: 040 32818-139
E-Mail: info@ims-ing.de

**Niederlassung
Frankfurt/M**
An der Gehespitz 50
63263 Neu-Isenburg
Tel.: 06102 45-3600
Fax: 06102 45-3636
E-Mail: info@ims-ing.de

**Niederlassung
Schleswig-Holstein**
Ulmenweg 12
25492 Heist
Tel.: 04122 907054
Fax: 04122 907053
E-Mail info@ims-ing.de