

Ermittlung der Kräfte bei Ankerwurf auf Kreuzungsbauwerke

Determination of the Forces Acting on Crossing Structures During Anchor Drop

Dipl.-Ing. Holger Becker, Bundesanstalt für Wasserbau

Ausgehend von der aktuellen Problematik an einem Straßentunnel unter dem Nord-Ostsee-Kanal wurden Untersuchungen zur Bestimmung der Einwirkung aus Ankerwurf auf Kreuzungsbauwerke unter Wasserstraßen durchgeführt. Neben dem Studium von international verfügbarer Literatur zu artverwandten Themen waren Ankerwurfversuche an eigenen Schiffen der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) zur Bestimmung der Ankerfallgeschwindigkeit wesentlicher Bestandteil. Die Auswertung der Versuche mündete in einen verallgemeinerten rechnerischen Ansatz zur Bestimmung der Ankerfallgeschwindigkeit. Durch numerische Simulationen konnte anschließend die Beanspruchung auf das Kreuzungsbauwerk bestimmt werden. Die Ermittlung der Beanspruchung mit vereinfachten Mitteln soll in einem weiteren Schritt versuchsgestützt kalibriert und ebenfalls verallgemeinert werden.

Various studies have been carried out to determine the impact of dropped anchors on crossing structures under waterways, taking the current problem of a road tunnel underneath the Kiel Canal as a starting point. In addition to an investigation of the international literature already available on similar topics, anchor drop tests on the German Federal Waterways and Shipping Administration's own vessels to determine the anchor velocities also played an important role. The evaluation of the tests yielded a generalized computational method for determining anchor velocities. The stresses acting on the crossing structure were subsequently determined by means of numerical simulations. A simplified determination of these stresses will be calibrated and likewise generalized in a further step with the help of tests.

1 Einleitung *Introduction*

Notsituationen in der Schifffahrt können trotz Ankerwurfverbots oftmals zum Werfen eines Ankers führen. Für Kreuzungsbauwerke unter der Wasserstraße, wie z. B. Düker, Tunnel- oder Unterführungsanlagen, ergibt sich hieraus ein Gefährdungspotenzial, welches im Schadensfall die Funktionstüchtigkeit des Bauwerkes einschränkt (z. B. Volllaufen eines Tunnels mit Wasser) und bei Kanälen ferner zum Leerlaufen einer ganzen Kanalstrecke führen kann.

Während in der Vergangenheit eine Vielzahl von Untersuchungen zum Thema des auf dem Grund schleppenden Ankers durchgeführt wurde, sind solche zu Aufprallgeschwindigkeiten bzw. -kräften von Ankern nur in geringem Maß vorhanden. Sowohl in den Veröffentlichungen als auch in den international teilweise vorhandenen Bemessungsansätzen variieren die Angaben hierzu sehr deutlich, was zu einer sehr großen Streubreite im Bemessungsergebnis für das jeweilige Bauwerk führt. Bisher erfolgte daher bei der Neuprojektierung von unterirdischen Kreuzungsbauwerken ein frei gewählter Ansatz der Auftreffgeschwindigkeit, aus welcher dann in Abhängigkeit von der Bauwerksgeometrie und weiteren Randbedingungen eine individuell geprägte statisch anzusetzende Ersatzlast ermittelt wurde. Während ein Neubau mittels der neu zu planenden Konstruktion hierauf abgestimmt werden kann, erfordert die Nachrechnung einer bestehenden Anlage einen realitätsnahen Ansatz, da hier vielfach in der Bemessung auf einen Ansatz des Lastfalles Ankerwurf verzichtet wurde und entsprechende Tragfähigkeitsreserven nur begrenzt vorhanden sind.

Primäres Ziel und Auslöser des Forschungsvorhabens ist die projektbezogene Ermittlung der Beanspruchung aus Ankerwurf auf den bestehenden Straßentunnel unter dem Nord-Ostsee-Kanal (NOK) in Rendsburg. Hierzu ist die realitätsnahe Ermittlung der Ankergeschwindigkeit im Wasser sowie der Energieumwandlung im Überdeckungsmaterial und der hieraus resultierenden Beanspruchung der Tunneldecke notwendig. Neben der projektbezogenen Ermittlung sollen die sich ergebenden Ansätze zur grundsätzlichen Anwendung auf Kreuzungsbauwerke vornehmlich im Binnenbereich verallgemeinert werden.

2 Festlegung der Bemessungsankergröße

Specification of the anchor's design size

2.1 Allgemeines

General

Für verschiedene Wasserstraßen – so auch für den NOK – liegen Statistiken zu Schiffsverkehr sowie Unfällen vor. Während am NOK erstere sogar mit dem Namen der passierenden Schiffe geführt werden, erfasst dort die Unfallstatistik nur die gemeldeten Fälle nach Bruttoreaumzahlgruppe mit Unfallort und -ursache. Zwar werden hierbei auch die Schiffstypen miterfasst; allerdings lassen sich aus den vorliegenden Angaben zu Unfällen keine direkten Zuordnungen zu beteiligten Ankergrößen herstellen, sodass nur eine ungefähre Bandbreite der Ankergewichte den Unfällen zugeordnet werden kann.

Aufgrund der Praxis des Ankerwerfens sowie der Vorgehensweise bei einem Unfall ist ein grundsätzlicher Kausalzusammenhang zwischen Unfall und Ankerwurf nicht vorhanden; schließlich wird nur ein Bruchteil der Unfälle überhaupt zum Werfen eines Ankers geführt haben. Da Angaben hierzu in der Statistik nicht enthalten sind, können nur Mutmaßungen angestellt werden. Gleichzeitig ist die Dunkelziffer der Unfälle, welche nicht gemeldet wurden, unbekannt. Ebenso unbekannt sind die Fälle, bei denen es zum Ankerwurf kam, es sich aber aufgrund fehlender Schäden um keinen Unfall handelt und sie daher auch nicht gemeldet wurden.

Somit existiert leider keine Statistik über Ankerwürfe. Allerdings wird davon ausgegangen, dass zumindest eine qualitative Korrelation zwischen Verteilung und Anzahl der Unfälle und derer von Ankerwürfen über die Strecke vorhanden ist. Auch quantitativ wird eine ähnliche Größenordnung vermutet, weshalb im Folgenden die Unfallzahlen der betrieblichen Schifffahrt als Datengrundlage auf Basis einer Analogie für Ankerwurf herangezogen werden. Somit können die nachfolgenden Ansätze nur als Versuch gewertet werden, eine zahlenmäßig greifbare Ankergröße für die Bemessung zu erhalten.

In Vrouwenfelder et al. (2004) wird für eine „belebte“ Wasserstraße (der NOK ist hierunter einzuordnen) ein Erwartungswert für einen Ankerwurf über einem Tunnel von ein Mal in 100 bis 1.000 Jahren ausgegangen. Nach Auswertung der Unfallzahlen und Festlegen des Bemessungsankers soll dieser Wert anhand der Unfallwahrscheinlichkeit über dem Tunnel überprüft und so die Zulässigkeit der Analogie zwischen Unfallstatistik und Ankerwurf verifiziert werden.

Die Zuordnung der in der Statistik aufgelisteten Schiffsgröße zu Ankergröße ist leider oft nicht eindeutig möglich, wenngleich anhand der Vorschriftenwerke der Klassifizierungsgesellschaften zumindest eine näherungsweise Zuordnung getätigt werden kann.

2.2 Bemessungsanker am Beispiel NOK

Design anchor taking the example of the Kiel Canal

Der Ankerwurf wird in Anlehnung an DIN EN 1991-1-7 (2010) in Verbindung mit dem Nationalen Anhang als außergewöhnliche Einwirkung definiert, deren Überschreitungswahrscheinlichkeit weniger als $p = 10^{-4}$ pro Jahr betragen soll.

Ausgehend von der Verteilung der Unfälle über die freie Strecke (= Kanalstrecke zwischen den Eingangsschleusen in Brunsbüttel und Kiel-Holtenau, Länge: 96,36 km) ermittelt sich aktuell eine Größe von 6,3 t als Bemessungsanker. Dabei liegt die Jährlichkeit des Auftretens eines Ankerwurfes über dem Tunnel Rendsburg bei 93,6 Jahren und unterschreitet somit geringfügig die in [L69] angegebene untere Grenze von ein Mal in 100 Jahren. Kommt in umgekehrter Weise diese untere

Grenze zum Ansatz, so ermittelt sich der aktuelle Bemessungsanker zu 6,2 t.

Unter Berücksichtigung von Deckenbereichen höherer Tragfähigkeit gegenüber Bereichen mit für diese Ankergröße nicht ausreichender Tragfähigkeit konnte im weiteren Verlauf der Bearbeitung die Bemessungsankergröße noch weiter reduziert werden. Bei Annahme einer aus der Statistik hergeleiteten zukünftigen Entwicklung der Unfallzahlen wurde für den in Bezug auf den Straßentunnel Rendsburg planerisch festgelegten Prognosehorizont von 40 Jahren letztendlich der Bemessungsanker zu 6,0 t bestimmt.

3 Ankerfallgeschwindigkeit im Wasser *Anchor velocity in the water*

3.1 Vorbemerkungen

Preliminary remarks

Für den Aufprall eines Objektes kann nach American Bureau of Shipping (2013) folgende Energiebilanz erstellt werden:

$$E_k = E_d + E_s + E_a$$

mit: $E_k = 0,5 * m * v^2$ kinetische Energie unmittelbar vor dem Aufprall

E_d : durch elastische/plastische Verformung des fallenden Objekts aufgenommene Energie

E_s : durch elastische/plastische Verformung der getroffenen Konstruktion aufgenommene Energie

E_a : Energieabsorption durch ggf. vorhandene Schutzschichten

In den meisten Fällen eines eher harten Stoßes (wie auch beim Ankerwurf) kann E_d , die Energieaufnahme durch das fallende Objekt, vernachlässigt werden. Die Definition eines harten Stoßes wird hier entsprechend Eibl et al. (1988) gewählt, wonach die kinetische Energie

der stoßenden Masse praktisch vollständig in Deformationsarbeit des gestoßenen Körpers umgesetzt wird.

Die Ermittlung von E_s und E_a bereitet in der Praxis Schwierigkeiten, da eine entsprechende Ermittlung komplexe nichtlineare FEM-Simulationen erfordert. Daher werden oftmals nach American Bureau of Shipping (2013) Näherungsformeln in Form von existierenden geschlossenen Gleichungen oder empirischen Tafeln bzw. Diagrammen verwendet.

In Det Norske verita, (2010a) wird der Masse des fallenden Objektes noch die hydrodynamische Masse a aus der erzwungenen Wasserbewegung hinzuaddiert, da diese Zusatzmasse beim Aufprall ebenfalls abgebremst wird, sodass die kinetische Energie dort angegeben wird zu

$$E_{kin} = 0,5 * (m + a) * v^2,$$

wobei m als Masse des fallenden Objekts angegeben wird.

Im Fall von Gegenständen mit großen Flächen quer zur Fallrichtung (z. B. Container) ergibt die Berücksichtigung eine signifikante Vergrößerung der kinetischen Energie. Nähere Angaben zur Ermittlung der hydrodynamischen Masse a werden in Det Norske veritas (2010b) gegeben:

$$a = \rho_w * C_a * V$$

mit: ρ_w : Dichte des Wassers in $[\text{kg}/\text{m}^3]$

C_a : Formbeiwert gemäß Tabelle 1

V : Volumen des Objektes (bzw. des verdrängten Wassers)

In Det Norske veritas (2010a) findet sich ein Ansatz zur Ermittlung der Energiedissipation eines Bohrgerätes beim Aufprall. In Bezug auf Ankerwurf kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund der geringen Fläche quer zur Fallrichtung die hydrodynamische Masse eine untergeordnete Rolle spielt.

Wesentlicher Eingangswert zur Ermittlung der auftretenden kinetischen Energie ist neben der Masse m des fallenden Objektes die Auftreffgeschwindigkeit v .

In der Literatur wird verschiedentlich die Geschwindigkeitsentwicklung von Gegenständen bei einem Fall im Wasser beschrieben. Der Fallkraft ist dabei eine Widerstandskraft entgegengesetzt, welche mit zunehmender Geschwindigkeit ansteigt. Haben beide Kräfte die gleiche Größe, findet keine Geschwindigkeitszunahme mehr statt, da die Kräfte im Gleichgewicht sind. Dadurch ergibt sich nach Det Norske veritas (2010b) für die Grenzgeschwindigkeit v_t im Wasser:

$$(m - V * \rho_w) * g = 0,5 * \rho_w * C_d * A * v_t^2$$

bzw.

$$v_t = \sqrt{\frac{(m - V * \rho_w) * g}{0,5 * \rho_w * C_d * A}}$$

- mit: m : Masse des Ankers in [kg]
- V : Volumen des Ankers in [m³]
- ρ_w : Wichte des Wassers in [kg/m³]
- C_d : Formbeiwert gemäß Tabelle 1
- A : projizierte Objektfläche quer zur Fallrichtung in [m²]

Objekt-kategorie	Beschreibung	C_d	C_a
1 – 3	schlanke Form	0,7 – 1,5	0,1 – 1,0
4 – 7	quaderförmig	1,2 – 1,3	0,6 – 1,5
1 – 7	gemischte Form	0,6 – 2,0	1,0 – 2,0

Tabelle 1: Formbeiwerte C_d und C_a aus Det Norske veritas (2010b)
 Table 1: Shape factors C_d and C_a from (Det Norske veritas, 2010b)

In Tabelle 1 werden Werte für C_d angegeben in Abhängigkeit der Körperform, wobei hier nur grob in schlank, quaderförmig und Mischform zwischen den beiden vor genannten unterschieden wird. Die gebräuchlichen Anker, welche nachfolgend noch vorgestellt werden, sind von der Form aufgrund ihrer Grundplatte im Bereich der Flunkenausbildung zwar nicht unbedingt als schlank zu bezeichnen, mit Sicherheit aber auch nicht quaderförmig. Daher werden sie in den Bereich zwischen schlank und Mischform eingeschätzt, was C_d -Werten von ca. 0,7 bis 2,0 entspricht. Entsprechend groß ist somit die Variationsbreite der hiermit ermittelten Geschwindigkeiten. Unter Annahme einer für gängige 6,0-t Anker abgeschätzten mittleren Fläche von 2,0 m², welche gegen das Wasser bewegt wird, ergeben sich Grenzgeschwindigkeiten zwischen 5,07 und 8,57 m/s.

Speziell für Anker finden sich in der Literatur diverse Angaben zur Grenzfallgeschwindigkeit im Wasser, welche in Tabelle 2 zusammengestellt sind:

Die rechnerische Ermittlung in van Aanhold et al. (1995) für einen 18-t-Anker beruht auf den Angaben aus dem Handbuch Anker der Firma Vryhof Anchor, Ausgabe 1990, Vorgängerauflage zu Vryhof anchors (2005). Dort wurde die dem Wasser ausgesetzte Widerstandsfläche mit

$$A = c_A * m_{Anker}^{2/3}$$

allgemein angegeben, wobei die Werte von c_A für unterschiedliche Ankertypen aufgeführt werden. Diese reichen von 0,0040 (Danforth) bis 0,0099 (US Navy). Eingesetzt in o. g. Formel für die Grenzgeschwindigkeit ergibt sich:

$$v_t = \sqrt{\frac{(\rho_{St.} - \rho_w) * g}{0,5 * \rho_{St.} * \rho_w * C_d * c_A}} * m^{1/6}$$

Literaturstelle	Bemerkungen	Grenzgeschwindigkeit [m/s]
(de Vries, 1988)	aus Fallversuchen für den Metrotunnel in Rotterdam	7,0
(Wens et al., 1992)	Angabe für Bemessungsanker von 18 t für den Liefkenshoektunnel	7,0 – 8,0
(Rabe, 1989)	Bemessungswert für Bau des Emstunnels bei Leer	5,0
(van Aanhold et al., 1995)	berechnet nach Auswertung verschiedener Ankertypen für einen 18-t-Anker	5,5 – 8,6
(Vrouwenfelder et al., 2004)		7,0 – 9,0

Tabelle 2: Grenzgeschwindigkeiten im Wasser für Ankerwurf aus der Literatur
 Table 2: Limit velocities in water of dropped anchors specified in the literature

Wird für die Masse des Ankers anstelle von 18.000 kg die für den Tunnel Rendsburg maßgebende Bemessungsankergröße von 6.000 kg eingesetzt, verringern sich die Grenzggeschwindigkeiten der in Tabelle 2 angegebenen Spanne in van Aanhold et al. (1995) auf 4,60 m/s bis 7,20 m/s. Für die Berechnung wurde nach van Aanhold et al. (1995) der C_d -Wert 1,5 verwendet.

Insgesamt ist festzustellen, dass mit nun vorhandenen Werten für die Grenzggeschwindigkeit von 4,60 m/s bis 9,0 m/s eine große Spanne besteht. Auch ist unklar, inwieweit bei den bisher durchgeführten Ankerwurfversuchen Einflüsse aus der Führung der Ankerkette auf dem Schiff mit Reibung an Klüse, Umlenkrollen oder Führungsschienen, Kettennuss und Ankerspill, usw. berücksichtigt wurden. Da neben der Ankermasse die Geschwindigkeit wesentlichen Einfluss auf die Größe der aufschlagenden Energie bzw. des Impulses hat, waren Ankerwurfversuche notwendig, die nachfolgend beschrieben werden.

3.2 Ankerwurfversuche *Anchor drop tests*

Die Ankerwurfversuche wurden daraufhin an WSV-eigenen Schiffen mit Ankergrößen von 1.280 kg bis 4.300 kg durchgeführt. Dabei betragen die vorhandenen Wassertiefen ca. zwischen 12,0 m und 40,0 m. Konzeption und Durchführung der Weg- und Fallgeschwindigkeitsmessung am Ankerspill erfolgte durch das Referat Technischer Support der BAW Karlsruhe.

Dabei wurde die abgelaufene Kettenlänge sowie die Fallgeschwindigkeit indirekt über die Messung der Winkelgeschwindigkeit der Kettennuss ermittelt, die durch die hindurchlaufende Ankerkette in Rotation versetzt wird. Das gewählte Messverfahren entspricht im Wesentlichen dem, wie es auch bei ABS-Systemen zu finden ist. Der verwendete Hall Sensor KM15/1 von Philips wird z. T. auch in solchen Systemen verbaut.

Wie Bild 1 zeigt, wurden auf der Bremsscheibe des Ankersystems äquidistant angeordnete Neodymmagnete angebracht und der Hallsensor in geringem Abstand fixiert. Die durchlaufenden Magnete lassen den Sensor schalten. Aus der Frequenz des Rechtecksignals am Sensorausgang konnte die Geschwindigkeit der durchlaufenden Ankerkette berechnet werden. Zur

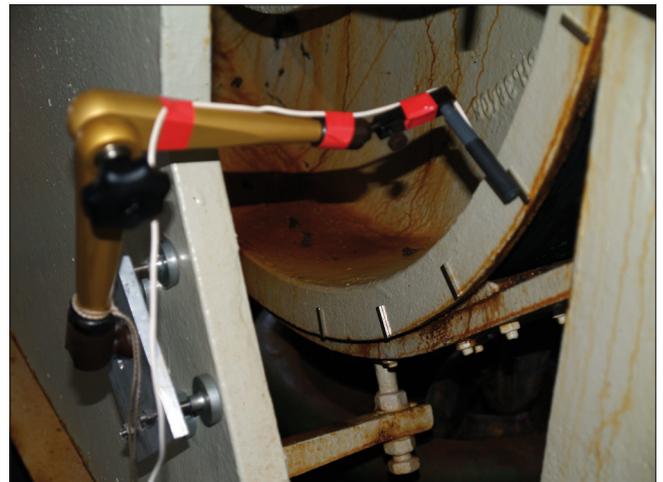


Bild 1: Bremsscheibe mit Magneten und Hallsensor
Figure 1: Brake disc with magnets and Hall sensor

Kalibrierung des Systems wurde nach jedem Aufbau eine Testlänge abgesenkt und die Anzahl der Impulse protokolliert. Ebenso erfolgte nach jedem Fallversuch beim Hochziehen des Ankers eine Rückwärtszählung der Impulse.

Das Ausgangssignal wurde mit dem Spider 8 der Firma HBM erfasst und mit der Messsoftware BEAM der Firma AMS protokolliert, mit der anschließend auch die Ganglinie dargestellt werden konnte.

3.3 Auswertung der Versuche und Berechnungsansatz *Evaluation of the tests and computational approach*

3.3.1 Allgemeines *General*

Durch die indirekte Messung können der tatsächlichen Ankergeschwindigkeit noch weitere Einflüsse überlagert sein, wie z. B. Schwingungen der Kette im freien Kettenbereich zwischen den Führungen oder auch ein Vorlaufen der Kette beim Abbremsen des Ankers. Somit ist eine eindeutige Zuordnung der Geschwindigkeit zu der des Ankers leider nur bedingt möglich; dies erfordert daher eine eingehende Beschäftigung und sorgfältige Interpretation der vorhandenen Messwerte.

Grundsätzlich können die jeweiligen Versuche in drei Phasen unterteilt werden:

- Die Luftphase: Der Anker fällt aus der Klüse bis zur Wasseroberfläche (Fallstrecke h_1 , s. Bild 2).
- Die Wasserphase: Nach dem Durchdringen der Wasseroberfläche bewegt sich der Anker bis zum Grund (Fallstrecke h_2 , s. Bild 2).
- Die Grundphase: Der Anker trifft auf dem Grund auf, die Ankerkette läuft bis zur Betätigung der Bandbremse nach.

In der **Luftphase** wird die anteilige potenzielle Energie E_{pot} von Anker und Ankerkette in kinetische Energie E_{kin} beider Elemente sowie Rotationsenergie E_{rot} der drehenden Teile von Ankerspill und Umlenkrollen umgewandelt. Gleichzeitig wird ein Teil der Energie durch Reibung in den Lagern von Ankerspill und Umlenkrollen sowie der Kette an Führungselementen (z. B. Durchtrittsrohr aus der Kettenkammer, Kettenführung bei Umlenkrolle, Ankerklüse) und Luftwiderstand dem Ankersystem entzogen.

Der Reibungsanteil ist im Wesentlichen konstruktiv bedingt und kann daher je nach Bauart deutlich variieren. Daher ist für diesen Anteil zunächst nur eine grobe Abschätzung möglich. Hinzu kommt, dass diese Phase mit dem Entspannen der Bandbremse durch händisches Aufdrehen beginnt. Sobald hierbei die potenzielle

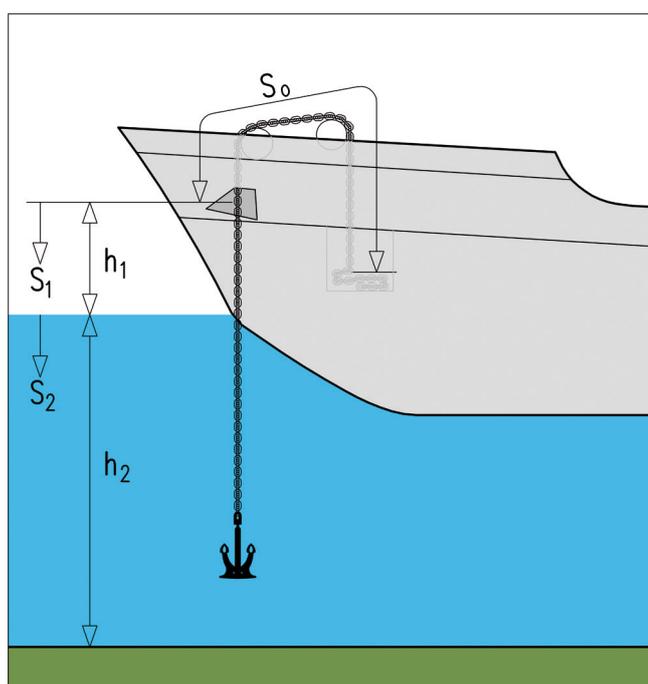


Bild 2: Längenbezeichnung Ankerwurf
 Figure 2: Length dimension of a dropped anchor

le Energie die noch vorhandene Restreibungenergie der Bremse überwindet, setzen sich Anker und Ankerkette in Bewegung. Hierdurch ist bis zur vollständigen Lösung der Bremse noch ein weiterer Widerstand vorhanden, der sich in den Untersuchungsschiffen durch eine mehr oder weniger ausgeprägte flachere Neigung im Geschwindigkeit-Weg-Diagramm zu Beginn der Luftphase bemerkbar macht.

Ebenfalls nur näherungsweise zu ermitteln ist die Rotationsenergie, da detaillierte Baupläne der Ankerspills nicht vorliegen, wohingegen der Anteil der verhältnismäßig kleinen Umlenkrollen über der Ankerklüse vernachlässigt werden kann. Beide Anteile (Reibung und Rotation) können allerdings anhand der vorhandenen Messwerte im Vergleich der Energiebilanzen der unterschiedlichen Phasen zumindest in guter Näherung ermittelt werden.

Bei der Ermittlung des Energieverlustes aus dem Luftwiderstand ist der für den Anker bisher bestenfalls nur vage bekannte C_d -Wert erforderlich. Eine Parameterstudie ergab einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Energiebilanz: Exemplarisch konnte bei einer Versuchsreihe der Anteil aus dem Luftwiderstand gegenüber der potenziellen Energie für den Fall in der Luft prozentual zu unter 0,2 % ermittelt werden. Damit ist der vernachlässigbare Einfluss des Luftwiderstandes nachgewiesen, sodass eine genaue Ermittlung des C_d -Wertes in dieser Phase unterbleiben kann.

Die **Wasserphase** beginnt mit dem Eintauchvorgang des Ankers in das Wasser. Auf die Behandlung des eigentlichen Eintauchvorganges mit Wasserverdrängung bis zur vollständigen Umhüllung des Ankerkörpers mit Wasser als eigenständige Phase wird vereinfachend verzichtet, da hieraus für die rechnerische Nachbetrachtung der Ankerwurfversuche keine entscheidenden Auswirkungen auf die Grenzgeschwindigkeit zu erwarten sind, wenngleich es hierdurch zumindest teilweise zu einer Verschiebung im Geschwindigkeit-Weg-Diagramm kommen kann, was im Vergleich Messung zu Berechnung festgestellt werden konnte (s. hierzu im Vergleich die exemplarischen Messwertvergleiche in Bild 3 und Bild 4). Effekte wie der Energieverlust durch Verdrängung des Wassers beim Aufprall (egal ob mit Oberflächenspannung des Wassers oder mit der Trägheit des Wassers argumentiert), die Änderung der Geschwindigkeit bei gleichbleibender kinetischer Energie

bis zur vollständigen Wasserumhüllung des Ankers bei sich allmählich aufbauendem Wasserwiderstand oder Kavitationseffekte beim schnellen Eintauchen unmittelbar an den rückseitigen Ankeroberflächen mit anschließender Bildung von Sekundärspritzer (auch eine Form der Energievernichtung) erschweren eine realitätsnahe rechnerische Erfassung des unmittelbaren Eintauchvorgangs bzw. machen eine solche für den Einzelfall praktisch unmöglich.

Unter der somit getroffenen Annahme einer zum Eintauchzeitpunkt vollständig wirksamen Wasserumhüllung des Ankers ergibt sich zu Beginn dieser Phase folgende im Ankeranlagensystem zu diesem Zeitpunkt vorhandene Energie:

$$E_{kin,Anker,1} + E_{kin,Kette,1} + E_{rot,1} + E_{pot,Anker,2} + E_{pot,Kette,2}$$

mit

- der kinetischen Energie des Ankers nach dem Eintauchen:

$$E_{kin,Anker,1} = \frac{1}{2} * m_{Anker} * v_1^2$$

Die nicht näher quantifizierbaren Energieverluste im Zusammenhang mit dem Eintauchvorgang im Wasser (Entstehung von Primär-, und Sekundärspritzer) werden außer Acht gelassen. v_1 bezeichnet die Ankergeschwindigkeit beim Eintritt in das Wasser.

- der kinetischen Energie der Ankerkette:

$$E_{kin,Kette,1} = \frac{1}{2} * m_{Kette} * (h_1 + s_0) * v_1^2$$

- der Rotationsenergie am Ankerspill:

$$E_{rot,1} = \frac{1}{2} * J_x * \omega_1^2$$

- der verbliebenen potenziellen Energie des Ankers:

$$E_{pot,Anker,2} = \frac{\rho_{Stahl} - \rho_{Wasser}}{\rho_{Stahl}} * m_{Anker} * g * h_2$$

mit h_2 als Höhe von Wasseroberfläche bis zum Grund (Wassertiefe).

$$\text{Der Bruch } \frac{\rho_{Stahl} - \rho_{Wasser}}{\rho_{Stahl}}$$

beschreibt die durch den Auftrieb reduzierte Masse des Ankers.

- der verbliebenen potenziellen Energie der Ankerkette:

$$E_{pot,Kette,2} = m_{Kette} * g * h_1 * h_2 + \frac{1}{2} * \frac{\rho_{Stahl} - \rho_{Wasser}}{\rho_{Stahl}} * m_{Kette} * g * h_2^2$$

Bremsend wirken nach wie vor der schon in der Luftphase beschriebene Reibungswiderstand sowie der nun anstelle des Luftwiderstandes vorhandene Wasserwiderstand. Dieser wirkt zunächst auf den Anker und wird bei idealem (senkrecht ausgerichtetem) Ankerfall über die Fläche A seiner Grundplatte beschrieben zu

$$E_{WW,Anker,2} = \frac{1}{2} * A * C_d * \rho_{Wasser} * \int_0^{h_2} v_2(s_2)^2 * ds_2$$

Weiterhin wirkt auch auf die Kette eine Widerstandskraft des Wassers, welche sich aus Elementen des Staudrucks und aus solchen des Reibungswiderstands entsprechend dem Stoke'schen Gesetz zusammensetzt. Eine realistische Ermittlung beider Bestandteile ist nur sehr vage möglich, zumal sich die Kette ja im „Windschatten“ des Ankers befindet, der zumindest im anfänglichen Teil der Kette diese Widerstandskraft deutlich reduziert.

Auch die Kettenglieder liegen zueinander im „Windschatten“; dieser kann näherungsweise nach dem für Auswertelgorithmen gut greifbaren rechnerischen Ansatz der alten Windnorm DIN 1055-4 (Ausgabe 03-2005) berücksichtigt werden.

Die Ermittlung eines prozentualen Abminderungsfaktors ξ im Verhältnis zu der sich im Wasser befindenden Kettenlänge s_2 zur Berücksichtigung des „Windschattens“ des Ankers, erfolgte nur in grober Abschätzung. Ausschlaggebend für die fehlende Vertiefung war die geringfügige Auswirkung eines solchen Abminderungsfaktors auf das Endergebnis. Wie anhand einer Parameterstudie gezeigt werden konnte, beträgt der Wasserwiderstand der Kette weniger als 10 % vom Wasserwiderstand des Ankers. Bei dieser Größenordnung kann ein zu verallgemeinernder Abminderungsfaktor aus den Versuchsdaten der begrenzten Anzahl von

nur vier Versuchsschiffen nicht hinreichend belastbar eliminiert werden. In Abhängigkeit der untersuchten Wassertiefe wurde daher ein abgeschätzter Wert zwischen 0,5 (bei kleinen Wassertiefen) bis 1,0 (bei großen Wassertiefen) gewählt. Hierdurch konnte jeweils eine hohe Übereinstimmung der Berechnung mit den Messergebnissen erzielt werden. Kleine Variationen dieses Wertes hatten keinen spürbaren Einfluss auf das Ergebnis, sodass der Verzicht auf eine exakte Ermittlung des Abminderungsfaktors gerechtfertigt werden kann.

Die in der unten vorgestellten Grundphase in voller Größe auf die Kette wirkende Wasserwiderstandsenergie errechnet sich entsprechend den vorgenannten Überlegungen zu:

$$E_{WW,Kette,2} = \frac{1}{2} * (1 + \eta + \left(\frac{h_2}{8 * d_K} - 2\right) * \eta^2) * \left(1 - \frac{A_{K,x}}{A_{K,ges}}\right) * 2 * 3,6 * d_K^2 * \rho * C_d \int v_2(s_2)^2 * ds_2$$

mit:

η : Abschattungsfaktor gemäß DIN 1055-4 (03/2005); bei den üblicherweise vorhandenen Kettenabmessungen: $\eta \sim 0,5$

h_2 : Wassertiefe bis zum Grund in [m]

d_K : Kettennenddurchmesser in [m]

$A_{K,ges}$: Doppelte vertikale Projektionsfläche eines senkrecht hängenden Kettengliedes

$A_{K,x}$: Überschneidungsfläche zweier unmittelbar aufeinanderfolgenden senkrecht hängenden Kettenglieder in der vertikalen Projektionsfläche

ρ : Rohdichte des Wassers, im Allgemeinen 1000 kg/m³

Während der Staudruck vom Quadrat der Geschwindigkeit abhängig ist, berechnet sich der Reibungswiderstand gemäß Stokes in dessen Grundgleichung zu

$$F_R = 6 * \pi * r * \eta * v$$

mit der Geschwindigkeit v nur in der ersten Potenz und r als äquivalente Ersatzkugel. η ist in dieser Gleichung

die dynamische Viskosität, welche bei 20°C warmen Wasser 1,0*10⁻³ [Pa*s] beträgt. Da die hieraus ermittelten Reibungswerte vernachlässigbar gering sind, wird der Stoke'sche Reibungsanteil nicht weiter betrachtet.

Somit kann für den Zeitpunkt unmittelbar vor Auftreffen des Ankers auf dem Grund ebenfalls die Energiebilanz aufgestellt werden:

$$E_{kin,Anker,1} + E_{kin,Kette,1} + E_{rot,1} + E_{pot,Anker,2} + E_{pot,Kette,2} - E_{R,2} - E_{WW,Anker,2} - E_{WW,Kette,2} = E_{kin,Anker,2} + E_{kin,Kette,2} + E_{rot,2}$$

mit:

$E_{R,2} = F_R * h_2$ Reibungsenergie bzw. Energieverlust infolge der Reibungskraft F_R an den Umlenk- und Leitungsstellen der Ankerkette während der Wasserphase (Phase 2).

$E_{kin,Anker}$ Kinetische Energie des Ankers bei Erreichen des Grundes mit der Geschwindigkeit $v_2=v(s_2=h_2)$.

$$E_{kin,Kette,2} = \frac{1}{2} * m_{Kette} * (h_1 + s_0 + h_2) * v_2^2$$

Kinetische Energie der Ankerkette beim Auftreffen des Ankers auf dem Grund.

$E_{rot,2} = \frac{1}{2} * J_x * \omega_2^2$ Rotationsenergie der drehenden Teile am Spill mit dem Trägheitsmoment J_x [kg*m²] beim Auftreffen des Ankers auf dem Grund.

$\omega_2 = \frac{v_2}{r}$ Winkelgeschwindigkeit zum Zeitpunkt des Auftreffens des Ankers auf dem Grund mit dem Radius r der Kettennuss bis zur Systemlinie der über sie laufenden Kette.

Nach Eichung der Größen für die Reibung und die Rotation anhand der Messwerte in der Grundphase kann die Energiebilanz kurz vor Auftreffen des Ankers auf dem Grund im ausgeschriebenen Zustand nach C_d aufgelöst werden, sodass sich ein für den jeweiligen Fall wirksamer C_d -Wert ermitteln lässt. Bei diesem Wert handelt es sich um den Mittelwert während des Fallvorgangs. Es ist nicht davon auszugehen, dass der Anker im Wasser in

gleichmäßig aufgerichteter Position fällt. Vielmehr wird er – auch in Abhängigkeit von der Stellung der Flunken gegenüber dem Stiel und dem Einfluss der Ankerkette – eine strömungsbedingte Ablenkung erfahren und ggf. Pendelbewegungen ausführen, sodass es zu einer permanenten Änderung der projizierten Fläche kommt, welche senkrecht zur Strömungsrichtung den Wasser-

widerstand aktiviert. Für eine exakte Bestimmung des C_d -Wertes mittels statistischer Auswertung wäre jeweils eine deutlich größere Anzahl von Wurfversuchen nötig gewesen, was allerdings zu einer stärkeren Betriebsbeeinträchtigung der freundlicherweise zur Verfügung gestellten Versuchsschiffe geführt hätte. Daher sind die ermittelten C_d -Werte als Näherungswert zu betrachten.

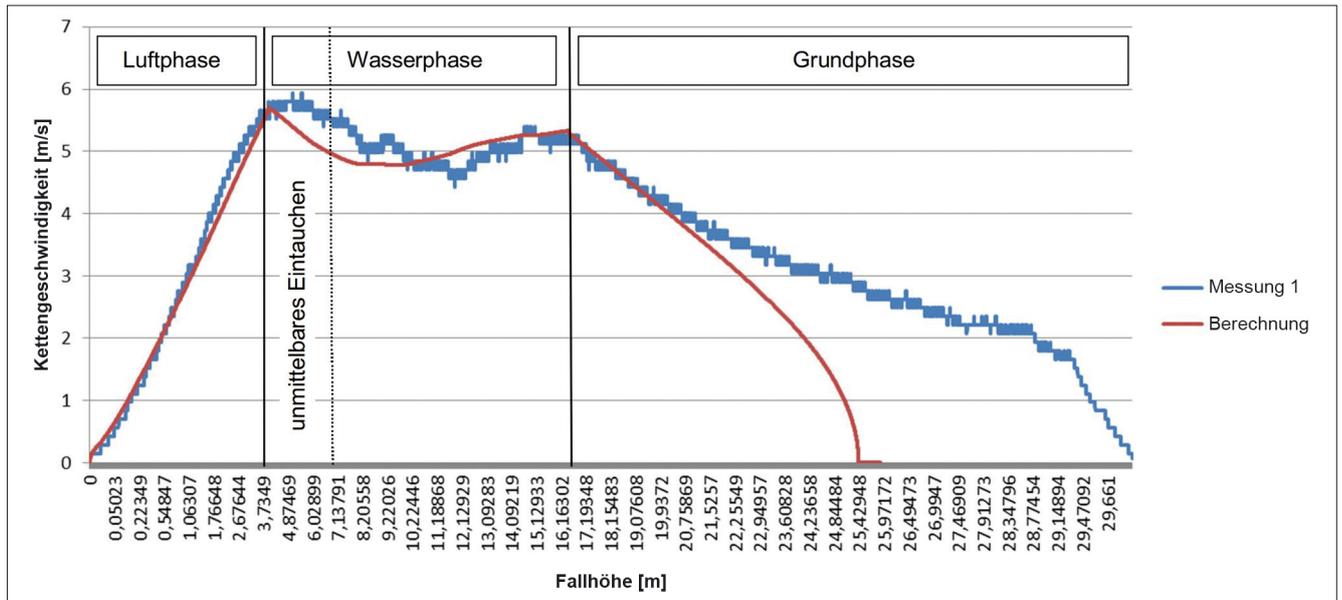


Bild 3: Exemplarische Messung mit ausgeprägtem Eintauchvorgang und entsprechender Verschiebung der Berechnung gegenüber der Messung in der Wasserphase

Figure 3: Typical measurement with pronounced entry process; the calculation deviates from the measurement in the water phase

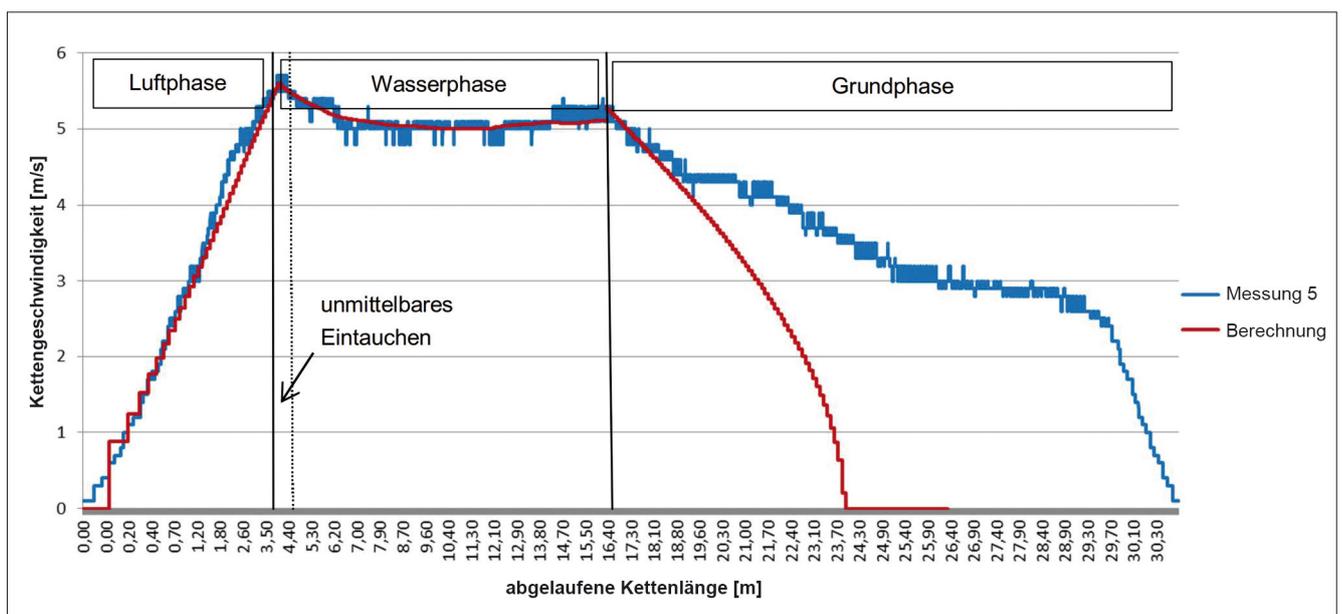


Bild 4: Exemplarische Messung mit nur schwach ausgeprägtem Eintauchvorgang und daher fast deckungsgleichem Verlauf von Berechnung und Messung in der Wasserphase

Figure 4: Typical measurement with less pronounced entry process; the calculation is almost identical to the measurement in the water phase

Mit dem Auftreffen des Ankers auf dem Grund beginnt die **Grundphase**. Hierbei wird der Anker deutlich schneller abgebremst als die auf die Kette wirkenden Bremskräfte (Reibung im Bereich der Ankeranlage sowie Wasserwiderstand auf die Kette), sodass die Kette weiter nachläuft. Gleichzeitig befindet sich der Anker an einem Fixpunkt am Grund, während das Schiff durch vorhandene Strömungen beeinflusst eine Bewegung gegenüber diesem Fixpunkt ausführt. Unmittelbar nach dem Auftreffen des Ankers ist diese Bewegung in den Messwerten noch unbedeutend; mit zunehmendem Abstand von diesem Fixpunkt und nachlassender Geschwindigkeit der Kette überlagert sich die aus der Schiffsbewegung resultierende Geschwindigkeit mit der Ablaufgeschwindigkeit der Kette, bei gleichzeitiger Zunahme der potenziellen Kettenenergie infolge Schrägstellung der Kette und damit verbundener größerer Kettenlänge zwischen Ankerklüse und Grund.

Ein Vergleich von Berechnung und Messung mit Eichung der Werte zu Rotation und Reibung konnte daher nur zum Zeitpunkt unmittelbar nach Auftreffen des Ankers auf dem Grund stattfinden, da hier der aus dem oben beschriebenen Effekt resultierende Fehler vernachlässigbar ist. Im weiteren Verlauf stellt sich dann eine zunehmende Diskrepanz zwischen Messung und Berechnung ein (s. Bild 3 und Bild 4). Über die Energiebilanz unmittelbar nach Auftreffen des Ankers auf dem Grund

$$E_{kin,Kette,2} + E_{rot,2} + E_{pot,Kette,3} - E_{R,2} - \Delta E_{kin,Kette} - E_{WW,Kette,3} = E_{kin,Kette,3} + E_{rot,3}$$

erfolgte die Eichung der Parameter für die Reibung ($E_{R,2}$) und die Rotation ($E_{rot,2}$ bzw. $E_{rot,3}$); Index 2 bezeichnet hierbei den Zustand zum Ende der Wasserphase, Index 3 den sich in der Grundphase sich entwickelnden Zustand.

3.3.2 Ergebnisse *Results*

Der Mittelwert für C_d über alle Versuchsschiffe konnte zu 1,02 ermittelt werden, der mittlere Verhältniswert von Reibungskraft zu Ankermasse zu 4,10 N/kg. Aus den für die einzelnen Schiffe gemittelten Rotationsfaktoren R kann näherungsweise ein Zusammenhang in Abhängigkeit zur Ankermasse m_A erfolgen, wie aus Bild 5 ersichtlich.

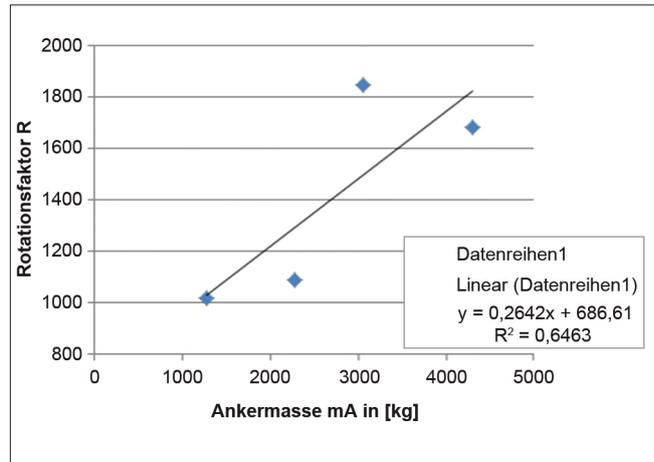


Bild 5: Rotationsfaktor R in Abhängigkeit zur Ankermasse m_A
 Figure 5: *Rotation factor R as a function of the anchor mass m_A*

Ebenfalls kann für die über dem Wasserspiegel vorhandene Fallhöhe h_1 näherungsweise eine Abhängigkeit von der Ankermasse festgestellt werden, s. Bild 6.

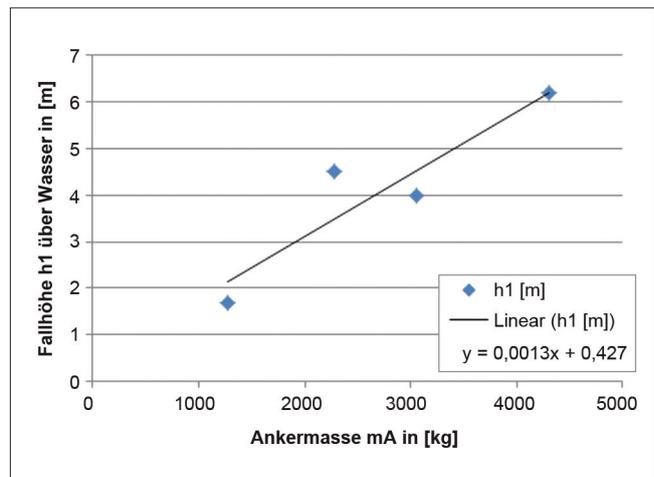


Bild 6: Fallhöhe h_1 über Wasser in Abhängigkeit zur Ankermasse m_A
 Figure 6: *Drop height h_1 above the water as a function of the anchor mass m_A*

Sowohl die Trendgleichung zu R als auch die zu h_1 sind aufgrund der geringen Anzahl der Versuchsschiffe mit Unsicherheiten verbunden. Durch Versuche an verschiedenen weiteren Schiffen wäre es möglich, eine genauere Spezifizierung der beiden Trendlinien vorzunehmen, welche derzeit vereinfacht als lineare Gleichung angenommen wurden.

Die verallgemeinerte Gleichung zur Ermittlung der Ankergeschwindigkeit v_2 im Wasser lautet:

$$v_2(s_2) = \left(\frac{0,5 * m_A * v_1^2 + 0,5 * m_K * (h_1 + s_0) * v_1^2 + 0,5 * R * v_1^2 - F_R * s_2 + 0,873 * m_A * g * s_2}{0,5 * m_A + 0,5 * m_K * (s_0 + h_1 + s_2) + 0,5 * R} + \frac{m_K * g * (h_1 * s_2 + 0,5 * 0,873 * s_2^2) - 0,5 * A_A * \rho * C_d * \int v_2(s_2)^2 ds_2}{0,5 * m_A + 0,5 * m_K * (s_0 + h_1 + s_2) + 0,5 * R} - \frac{0,5 * \xi * C_d * \rho * 6,2 * d_k^2 * \int \left(\left(1 + \eta + \left(\frac{s_2}{8 * d_k} - 2 \right) * \eta^2 \right) * v_2(s_2)^2 \right) * ds_2}{0,5 * m_A + 0,5 * m_K * (s_0 + h_1 + s_2) + 0,5 * R} \right)^{0,5}$$

mit:

m_A : Masse des Ankers in [kg]

m_K : Masse der Ankerkette in [kg/m]

h_1 : Fallhöhe von Ankerklüse bis Wasseroberfläche

s_0 : Länge des sich zwischen Kettenkammer und Ankerklüse befindenden Kettenteils

s_2 : Falltiefe im Wasser in [m], s. Bild 2

R : Faktor zur Beschreibung des Rotationsanteils:
 $R = \frac{J_x}{I^2}$

F_R : Reibungskraft der Kette an den Umlenk- und Leitungsstellen in [N].

A_A : Projektionsfläche des Ankers senkrecht zur Fallrichtung in [m²]

ρ : Wichte des Wassers in [kg/m³]

C_d : Faktor des formabhängigen Strömungswiderstandes

ξ : prozentualer Faktor zur Entwicklung des Wasserwiderstandes der Kette über die Länge h_2 .

d_k : Kettennendurchmesser in [m]

η : Abschattungsfaktor; bei den üblicherweise vorhandenen Kettenabmessungen: $\approx 0,5$

die Reibungskraft F_R , der nach Bild 5 ermittelter Rotationsfaktor R und die über dem Wasserspiegel ermittelte Fallhöhe h_1 (s. Bild 6) sowie die Projektionsfläche A_A des Ankers (s. Bild 7) approximativ zum Ansatz gebracht:

$$A_A = 0,0061 * m_A^{0,666}$$

$$F_R = 4,1 * m_A$$

$$R = 0,2642 * m_A + 686,61$$

$$h_1 = 0,0013 * m_A + 0,427$$

Um die Zulässigkeit dieser Approximationen in ihren Auswirkungen auf die berechnete Ankergeschwindigkeit besser beurteilen zu können, blieb eine Approximation des Kettendurchmessers d_k und des Kettengewichtes m_K zunächst unberücksichtigt:

$$d_k = 0,9848 * m_A^{0,5027}$$

$$m_K = 0,0223 * m_A - 0,0869$$

Vorberechnungen haben gezeigt, dass die aus den verschiedenen Kettengütenklassen resultierenden Unterschiede im Kettengewicht für die weitere Geschwindigkeitsentwicklung von Bedeutung sind, und die Wahl des jeweiligen Gewichts einer Kette der hierzu ungünstigsten Güte K1 bei den Versuchsschiffen mit Güteklasse K2 oder K3 einen zu ungünstigen Geschwindigkeitsverlauf nimmt. Daher kamen bei der vergleichenden Berechnung noch die tatsächlich vorhandenen Daten der Ankerkette zum Ansatz.

In einem weiteren Schritt werden die aus den Versuchen abgeleiteten Werte und Trendlinien zum Strömungswiderstandswert C_d , der gemittelter Ansatz für

Die somit teilweise approximierten bzw. auf die Variable m_A verallgemeinerte Gleichung lautet:

$$v_2(s_2) = \left(\frac{0,5 * m_A * v_1^2 + 0,5 * m_K * (0,0013 * m_A + 0,427 + s_0) * v_1^2}{0,5 * m_A + 0,5 * m_K * (0,0013 * m_A + 0,427 + s_0 + s_2) + 0,5 * (0,2642 * m_A + 686,61)} \right. \\ + \frac{0,5 * (0,2642 * m_A + 686,61) * v_1^2 - 4,1 * m_A * s_2 + 0,873 * m_A * g * s_2}{0,5 * m_A + 0,5 * m_K * (0,0013 * m_A + 0,427 + s_0 + s_2) + 0,5 * (0,2642 * m_A + 686,61)} \\ + \frac{m_K * g * ((0,0013 * m_A + 0,427) * s_2 + 0,5 * 0,873 * s_2^2)}{0,5 * m_A + 0,5 * m_K * (0,0013 * m_A + 0,427 + s_0 + s_2) + 0,5 * (0,2642 * m_A + 686,61)} \\ - \frac{0,5 * 0,0061 * m_A^{0,666} * \rho * C_d * \int v_2(s_2)^2 ds_2}{0,5 * m_A + 0,5 * m_K * (0,0013 * m_A + 0,427 + s_0 + s_2) + 0,5 * (0,2642 * m_A + 686,61)} \\ \left. - \frac{0,5 * \xi * C_d * \rho * 6,2 * d_k^2 * \int \left(\left(1 + \eta + \left(\frac{s_2}{8 * d_k} - 2 \right) * \eta^2 \right) * v_2(s_2)^2 \right) * ds_2}{0,5 * m_A + 0,5 * m_K * (0,0013 * m_A + 0,427 + s_0 + s_2) + 0,5 * (0,2642 * m_A + 686,61)} \right)^{0,5}$$

Die Nachrechnung der Ankerwurfversuche durch die approximierte Gleichung zeigte ebenfalls eine hohe Übereinstimmung mit den Messwerten. Für die praktische Anwendung allerdings ist Größe und Form der Gleichung nur bedingt geeignet, weshalb ein empirischer Ansatz entwickelt wurde. Dieser ist in seinem Anwendungsbereich auf Wassertiefen s_2 von 4,0 m bis 20,0 m sowie auf Anfangsgeschwindigkeiten beim Eindringen in das Wasser zwischen 0 m/s und 10 m/s begrenzt:

$$v_2(m_A, s_2, v_1) = \alpha * m_A^\beta$$

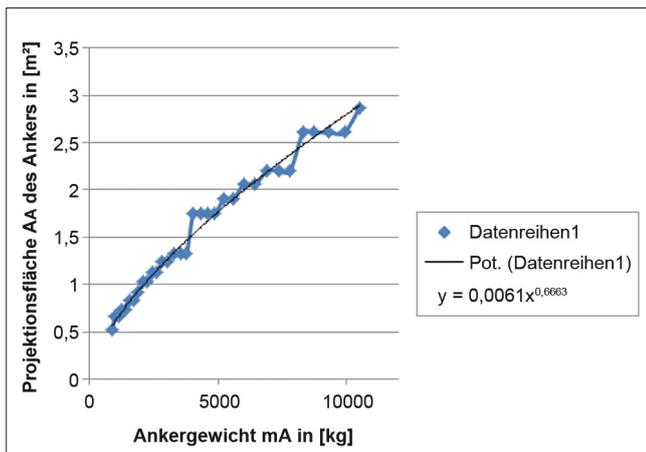


Bild 7: Vertikale Projektionsfläche A_A eines Ankers (Typ Spek) in Abhängigkeit von m_A nach Auswertung von (Germanischer Lloyd, 2012; Vryhof anchors, 2005; Aeromarine Equipments Supply Pvt, 2009; Seacat – Schmeding International GmbH, 2011; Wortelboer, 2015)

Figure 7: Vertical projection area A_A of an anchor (type: Spek) as a function of m_A according to an evaluation by (Germanischer Lloyd, 2012; Vryhof anchors, 2005; Aeromarine Equipments Supply Pvt, 2009; Seacat – Schmeding International GmbH, 2011; Wortelboer, 2015)

Die Werte α und β sind Polynomfunktionen dritten Grades, abhängig von der Anfangsgeschwindigkeit v_1 und der Falltiefe s_2 :

$$\alpha(s_2, v_1) = a(s_2) * v_1^3 + b(s_2) * v_1^2 + c(s_2) * v_1 + d(s_2)$$

$$\beta(s_2, v_1) = e(s_2) * v_1^3 + f(s_2) * v_1^2 + g(s_2) * v_1 + h(s_2)$$

Darin sind die Faktoren a, b, c, e, f, g sowie die Konstanten d und h ebenfalls Polynomfunktionen dritten Grades, welche nur noch von der betrachteten Falltiefe s_2 abhängig sind:

$$a(s_2) = 1,1133 * 10^{-6} * s_2^3 - 4,8233 * 10^{-5} * s_2^2 + 6,9840 * 10^{-4} * s_2 - 0,0037$$

$$b(s_2) = -2,1404 * 10^{-5} * s_2^3 + 9,7249 * 10^{-4} * s_2^2 - 1,4836 * 10^{-2} * s_2 + 0,0820$$

$$c(s_2) = -1,1535 * 10^{-5} * s_2^3 + 5,2009 * 10^{-4} * s_2^2 - 7,5549 * 10^{-3} * s_2 + 0,0378$$

$$d(s_2) = 7,2305 * 10^{-5} * s_2^3 - 2,8377 * 10^{-3} * s_2^2 + 3,6045 * 10^{-2} * s_2 + 0,9767$$

$$e(s_2) = 5,5678 * 10^{-9} * s_2^3 - 4,8400 * 10^{-8} * s_2^2 - 5,4000 * 10^{-6} * s_2 + 0,0001$$

$$f(s_2) = -3,3074 * 10^{-7} * s_2^3 + 1,3282 * 10^{-5} * s_2^2 - 1,2290 * 10^{-4} * s_2 - 0,0006$$

$$g(s_2) = 4,8961 * 10^{-6} * s_2^3 - 2,1822 * 10^{-4} * s_2^2 + 3,1601 * 10^{-3} * s_2 - 0,0153$$

$$h(s_2) = 6,7393 * 10^{-6} * s_2^3 - 3,8997 * 10^{-4} * s_2^2 + 8,405 * 10^{-3} * s_2 + 0,1374$$

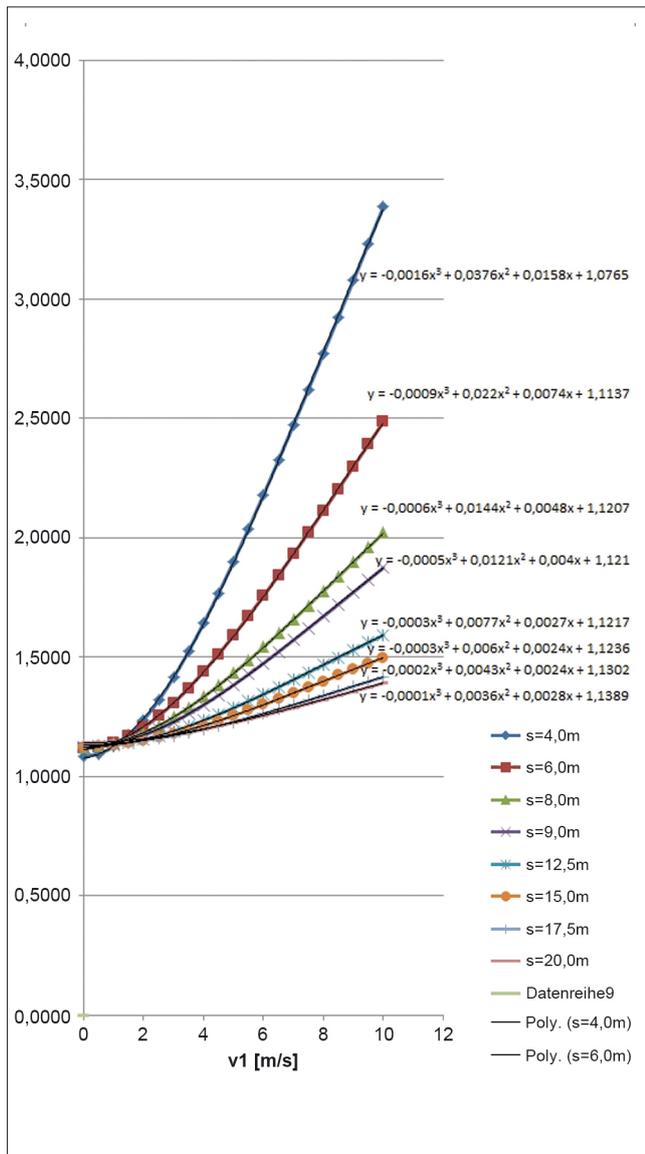


Bild 8: Funktion der α -Werte in Abhängigkeit von s_2 und v_1
 Figure 8: α values as a function of s_2 and v_1

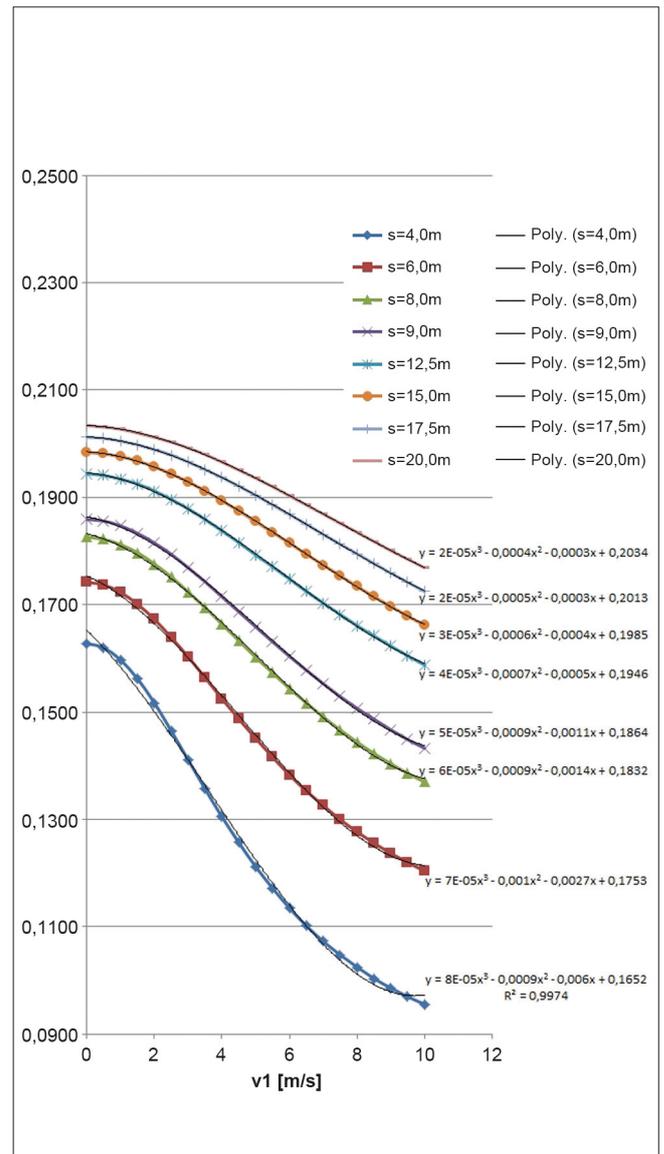


Bild 9: Funktion der β -Werte in Abhängigkeit von s_2 und v_1
 Figure 9: β values as a function of s_2 and v_1

Entweder durch schrittweises Lösen dieser Gleichungen zur Ermittlung der Werte α und β oder deren AbleSEN aus Bild 8 und Bild 9 ist es möglich, für den angegebenen Anwendungsbereich über

$$v_2(m_A, s_2, v_1) = \alpha * m_A^\beta$$

die Fallgeschwindigkeit eines Ankers im Wasser in Abhängigkeit von m_A zu ermitteln.

Die Nachrechnung der durchgeführten Ankerwurfversuche bestätigt die Gültigkeit der empirischen

Gleichung. Gleichzeitig zeigt sich dabei auch der zu Beginn dieses Abschnittes angegebene Geltungsbereich, außerhalb dessen ein deutliches Abweichen der mit der empirischen Formel erzeugten Kurve von den Messwerten bzw. den bisherigen analytischen oder semi-analytischen Berechnungsergebnissen vorhanden ist.

Ein Vergleich von Messwerten, analytischer/semi-analytischer Nachrechnung sowie empirischer Formel an exemplarisch ausgewählten Versuchen zeigen die Bilder 10 bis 13.

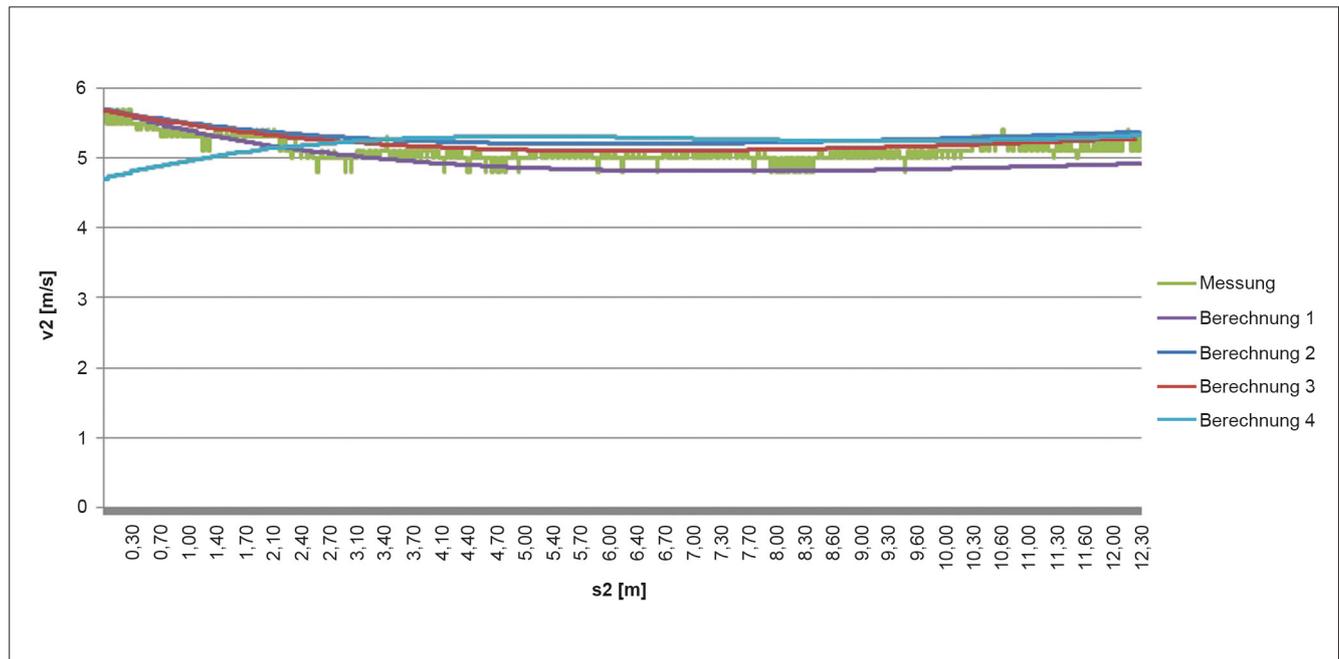


Bild 10: Vergleich Berechnung 4 (empirisch) zu Messung und analytischer/semi-analytischer Nachrechnung (Berechnung 1 bis 3) in Versuch Neuwerk 5

Figure 10: Comparison of calculation 4 (empirical) with the measurement and the analytical/semi-analytical recalculation (calculations 1 to 3) in the Neuwerk 5 test

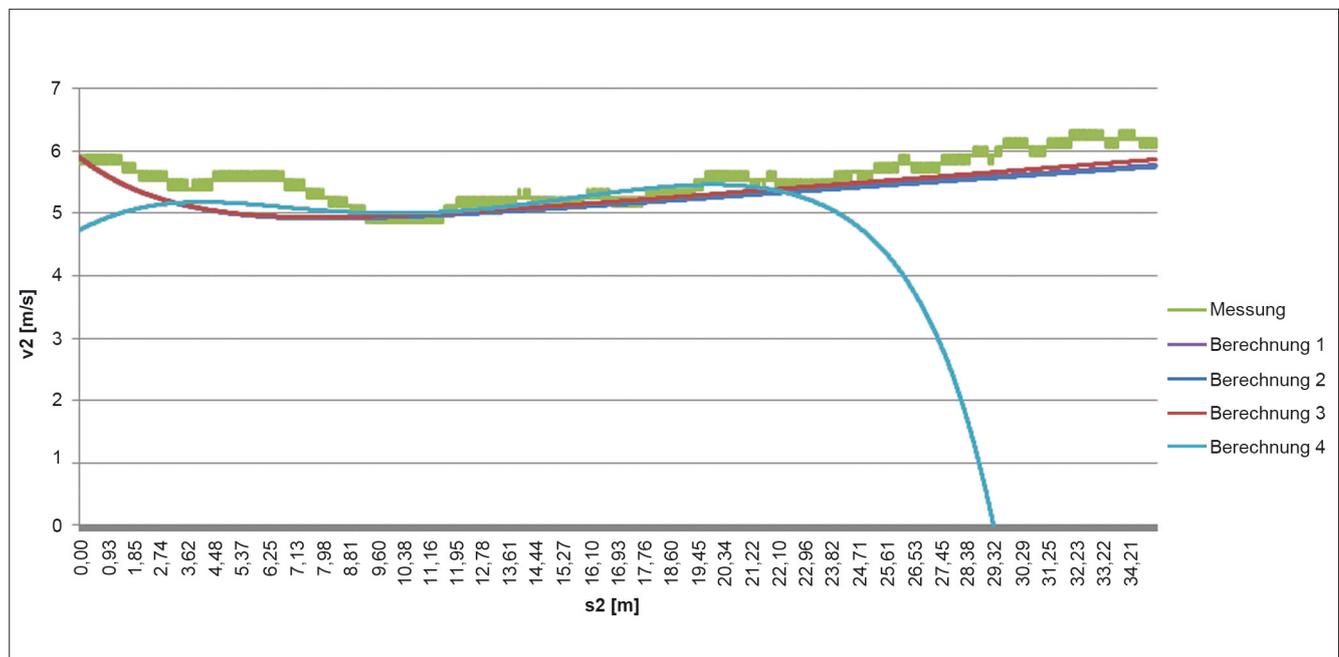


Bild 11: Vergleich Berechnung 4 (empirisch) zu Messung und analytischer/semi-analytischer Nachrechnung (Berechnung 1 bis 3) in Versuch Mellum 4

Figure 11: Comparison of calculation 4 (empirical) with the measurement and the analytical/semi-analytical recalculation (calculations 1 to 3) in the Mellum 4 test

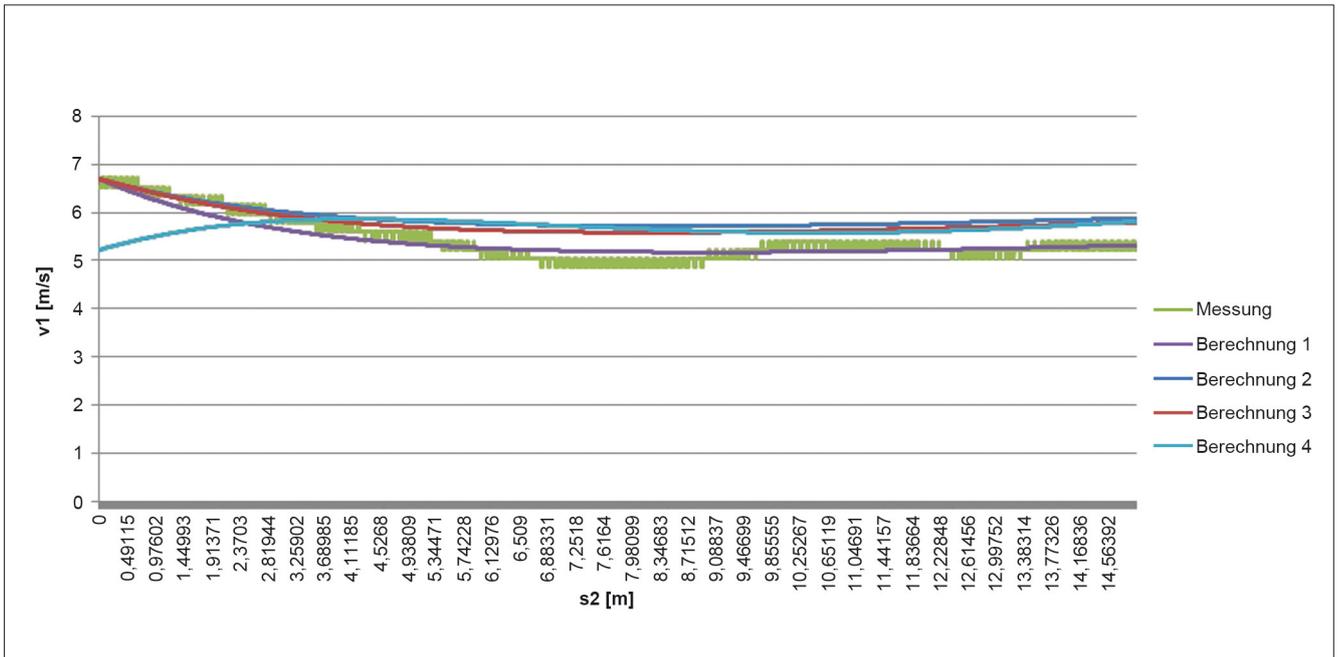


Bild 12: Vergleich Berechnung 4 (empirisch) zu Messung und analytischer/semi-analytischer Nachrechnung (Berechnung 1 bis 3) in Versuch Nordsee 5

Figure 12: Comparison of calculation 4 (empirical) with the measurement and the analytical/semi-analytical recalculation (calculations 1 to 3) in the North Sea 5 test

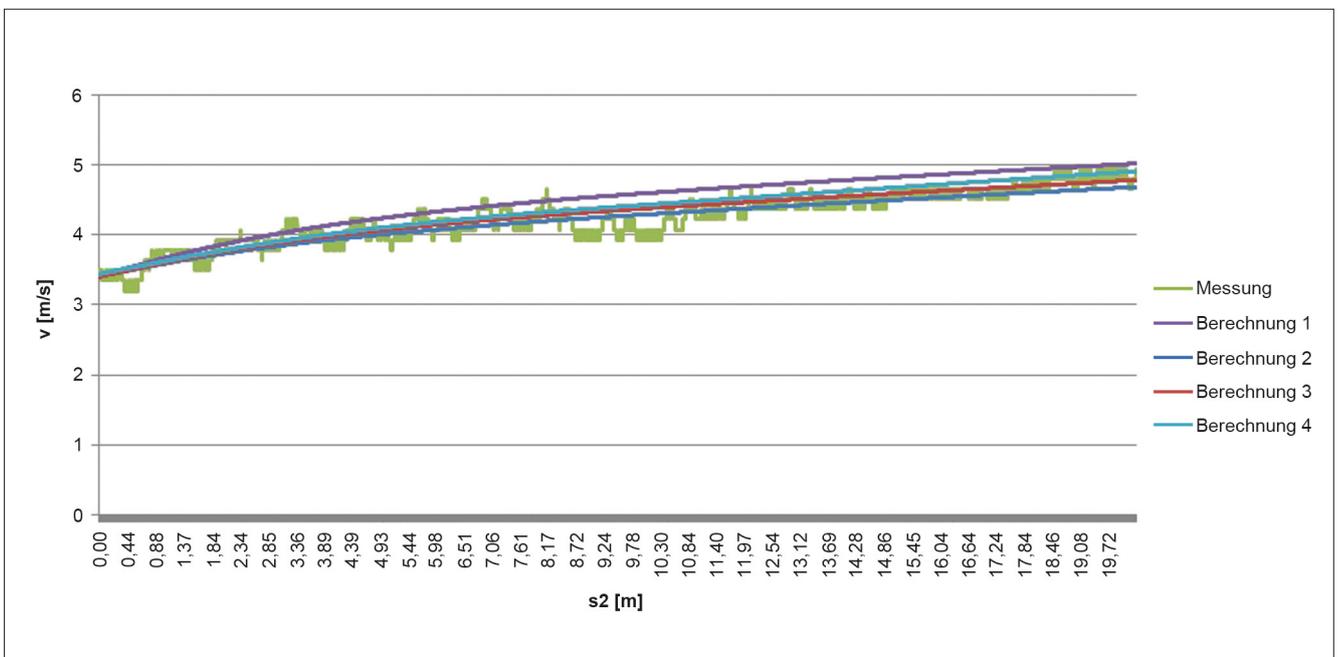


Bild 13: Vergleich Berechnung 4 (empirisch) zu Messung und analytischer/semi-analytischer Nachrechnung (Berechnung 1 bis 3) in Versuch Scharhorn 1

Figure 13: Comparison of calculation 4 (empirical) with the measurement and the analytical/semi-analytical recalculation (calculations 1 to 3) in the Scharhorn 1 test

Hinsichtlich der Wahl der Anfangsgeschwindigkeit v_1 bei Auftreffen des Ankers auf die Wasseroberfläche zeichnet die Auswertung der Messungen leider kein klares Bild. Das Auflösen der Energiebilanz für die Luftphase nach der Geschwindigkeit v_1 beim Erreichen der Wasseroberfläche ergibt:

$$v_1 = \sqrt{2 * \frac{m_A * g * h_1 + 0,5 * m_K * g * h_1^2 - F_R * h_1}{m_K * (h_1 + s_0) + W * h_1 + m_A + R}}$$

mit: $W = A_A * \rho * C_d$

Da die Ankerprojektionsfläche in vertikaler Richtung für den gewählten Spek-Anker in etwa der Funktion entspricht (s. Bild 7; aus der Vorgängerauflage zu Vryhof anchors, 2005) kann mit der Luftdichte $\rho \approx 1,204 \text{ kg/m}^3$ und dem ermittelten mittleren Strömungsbeiwert $C_d = 1,02$ der Faktor W in Abhängigkeit von m_A ausgedrückt werden:

$$\begin{aligned} W &= 0,0061 * m_A^{0,666} * 1,204 * 1,02 \\ &= 7,491 * 10^{-3} * m_A^{0,666} \end{aligned}$$

Da dieser Bestandteil in oben genannter Gleichung allerdings eine untergeordnete bzw. vernachlässigbare Größe darstellt, kommt – im Gegensatz zur zuvor untersuchten Situation im Wasser – der korrekten Wahl der Reibungskraft F_R und dem Rotationsfaktor R eine wesentlich größere Bedeutung zu. Beide sind in den Messungen allerdings noch mit Unsicherheiten verbunden, welche durch einen größeren Versuchsumfang zu verbessern wären. Dennoch konnte bei der Nachrechnung der durchgeführten Ankerwurfversuche auch hier eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten erzielt werden.

Eine Parameterstudie zeigte allerdings, dass die Auswirkungen der Wahl von v_1 auf die Ankergeschwindigkeit in einer betrachteten Wassertiefe von eher geringer Bedeutung sind. Für die Situation am NOK wird für den Bemessungsanker die Anfangsgeschwindigkeit v_1 zu 7,78 m/s abgeschätzt. Gemäß dem empirischen Ansatz ermittelt sich in der Tiefe von 12,5 m somit eine Ankergeschwindigkeit von 5,90 m/s. Allerdings deuten weitere Untersuchungen an, dass es durch die vereinfachte Ermittlung des Korrekturfaktors A zur Beschreibung des Integrals des Wasserwiderstandes auf den Anker in

dem Tiefenbereich um 12,0 m bei größeren Ankern zu einer Unterschätzung der Ankergeschwindigkeit nach der empirischen Gleichung kommt.

Die von der Überdeckung und der Tunneldecke aufzunehmende Energie lässt sich zu

$$E = \frac{1}{2} * 6000 * 5,90^2 * 10^{-3} \approx 104 \text{ kJ}$$

ermitteln.

4 Beanspruchung des Kreuzungsbauwerks

Stresses acting on the crossing structure

4.1 Beschreibung des Eindringvorgangs und der Folgen

Description of the entry process and its impacts

Das Eindringverhalten des Ankers in die Überschüttung geschieht zunächst über ein plastisches Verhalten des Bodenmaterials mit entsprechenden Umlagerungen der im betroffenen Bereich vorhandenen Materialpartikel. In dieser Phase wird ein Teil der Energie des Ankers in Reibungsenergie zwischen den Partikeln sowie kinetischer und teilweise potenzieller Energie der bewegten Partikel umgewandelt. Mit abnehmender Energie des Ankers und mit zunehmender Tiefe wachsendem Widerstand des Bodens wird – sofern eine ausreichende Überschüttungshöhe vorhanden ist – der Übergang vom plastischen zum elastischen Verhalten des Überschüttungsmaterials erreicht. Bedingt durch die soeben beschriebene Energieumwandlung wird in dieser plastischen Phase nur ein verhältnismäßig geringer Energieanteil an die Tunneldecke weitergeleitet. Je effektiver das vorhandene Material ein Eindringen zulässt, desto weniger Energie muss in der anschließenden elastischen Phase durch die Tunneldecke aufgenommen werden.

Die zu Beginn der elastischen Phase noch vorhandene Restenergie des Ankers wird über die elastische „Federwirkung“ bzw. Kompression des Bodens aufgenommen bzw. der Anker über die Weglänge der Kompressi-

on abgebremst. Der hierbei in den Boden eingetragene Impuls läuft als sich in Abhängigkeit vom vorhandenen Überschüttungsmaterial ausbreitende Druckwelle nach unten und trifft dort auf die Tunneldecke. Durch diese wird die Welle transmittiert und an der Deckenunterseite reflektiert. Infolge der Reflexion entstehen Zugspannungen im Beton, welche bei Überschreitung der aufnehmbaren Zugspannungen zu Abplatzungen vorwiegend im Bereich der Betondeckung führen können; eine netzartig vorhandene untere Bewehrungslage kann hierbei als „Auffangnetz“ für den oberhalb vorhandenen Beton dienen und daher die Abplatzungstiefe reduzieren, sofern die Bewehrung selbst nicht plastifiziert oder gar versagt. Dieses ist der Fall, wenn durch den Aufprall die Querkraft- oder Biegetragfähigkeit der Stahlbetondecke überschritten wird.

4.2 Numerische Erfassung des Eindringvorgangs

Numerical description of the entry process

Besonders zur Beschreibung der plastischen Phase des Eindringvorgangs wird zur Modellierung des Bodens ein Materialmodell benötigt, welches ein realitätsnahes Fließverhalten aufzeigt und gleichzeitig die Energieumwandlung in dieser Phase ausreichend beschreibt. Aufgrund der hierbei zu erwartenden hohen Verzerrungsrate erfordert dies eine Vorgehensweise, welche gemäß Keuser et al. (2012) neben dem Kräftegleichgewicht auch die Energie- und die Massenerhaltung berücksichtigt. Mit den im Bereich des Bauingenieurwesens üblichen FEM-Programmen, die auf einem netzbasierten Elementschema mit fester Ankoppelung des Materials (Lagrange-Elemente) beruhen, sind diese Voraussetzungen nicht gegeben. Der Grund hierfür liegt in erster Linie in numerischen Instabilitäten bei großen Elementverzerrungen. Für eine Weiterführung der Berechnung müsste der Vorgang einer sogenannten Erosion stattfinden, der Löschung der betroffenen Elemente, was wiederum Auswirkung auf die Energie- und Massenbilanz hätte mit nicht akzeptablem Einfluss auf die Ergebnisgenauigkeit (Gebekken und Linse, 2009).

Daher werden für die numerische Simulation solcher hochdynamischer Fälle sogenannte Hydrocodes verwendet, bei denen zusätzlich zum Kräftegleichgewicht herkömmlicher FEM-Programme auch die Gleichge-

wichtsbedingungen zur Massen- und Energieerhaltung aufgestellt werden. Die Modellierung des Überschüttungsmaterials kann geeigneterweise durch die SPH (**S**moothed **P**article **H**ydrodynamics)-Methode erfolgen. Mit dieser Methode können große Verzerrungen bzw. Verformungen sowie entstehende Risse abgebildet werden. Im Gegensatz zu den FEM-Verfahren wird das Material nicht als Element abgebildet, sondern als massenbehaftete Partikel, welche sich im Laufe der Berechnung auch voneinander lösen können. Die Grundlage hierfür liegt in einer Wichtungsfunktion, die in Abhängigkeit vom Abstand der jeweiligen Partikel deren gegenseitige Beeinflussung bestimmt. Aufgrund der starken Nichtlinearitäten arbeiten die entsprechenden Programmsysteme mit einem expliziten Lösungsverfahren, welches eine Berechnung mit kleinen Zeitschritten erfordert. Damit das Lösungsverfahren stabil ablaufen kann, müssen diese kleiner als der sogenannte kritische Zeitschritt sein, welcher durch das CFL (Courant-Friedrich-Lewy)-Kriterium

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{u}$$

beschrieben wird; Δx steht hierbei für die kürzeste Elementlänge und u für die höchste Wellenausbreitungsgeschwindigkeit der zu untersuchenden Materialien.

Da in der BAW für die Beschreibung von hochdynamischen Impakt-Vorgängen im wassergesättigten Boden sowie der anschließenden Interaktion zwischen Überschüttung und Tunneldecke mit dynamischen Verlauf keine entsprechende Software vorhanden ist, wurde das Institut für Mechanik und Statik, Lehrstuhl für Statik, Herr Prof. Dr.-Ing. habil. N. Gebekken, der Universität der Bundeswehr in München beauftragt, entsprechende numerische Simulationen durchzuführen.

Im Vordergrund stand dabei eine schrittweise Optimierung der zu treffenden Maßnahmen am Straßentunnel Rendsburg, weshalb die Beauftragung iterativ in mehreren Schritten erfolgte, jeweils abhängig vom Ergebnis der zuvor erfolgten Untersuchungen. So ergab sich für den Auftraggeber in Zusammenarbeit mit den Bearbeitern des Lehrstuhls für Statik bei der Universität der Bundeswehr die Möglichkeit einer jeweils möglichst klaren Aufgabenstellung und entsprechender Kalkulation.

Im Zuge der Bearbeitung konnte aufgrund der Dringlichkeit der Angaben für die Ankersicherung über dem

Straßentunnel Rendsburg für die vorhandenen Randbedingungen keine Validierung der Berechnungsergebnisse anhand von Modellversuchen stattfinden, sodass die in nachfolgenden Abschnitten für den Straßentunnel Rendsburg präsentierten Ergebnisse letztendlich noch rein theoretischer Natur sind.

4.3 Erkenntnisse aus den rechnerischen Untersuchungen

Insights derived from the computational studies

Die Untersuchung des Zustandes nach dem geplanten Kanalausbau ergab, dass für die Bereiche der Blockfugen des Tunnelmittelstückes teilweise keine ausreichende Tragfähigkeit bei Ankerwurf vorhanden ist. Daraufhin wurden als Schutzschicht, respektive Verstärkungsmaßnahme über der Überschüttung, folgende Materialien mit der zugehörigen Plattendicke untersucht:

- Stahlblech 25 bzw. 35 mm
- Beton 20 bzw. 30 cm
- Faserbeton 15 bzw. 25 cm
- Ducon 8 bzw. 12 cm (hochfester Beton, feinmaschig bewehrt)

Zur Untersuchung der Schutzschichten wurden sowohl gerades als auch schräges Auftreffen des Ankers untersucht. Hierbei konnte für den Fall des schrägen Auftreffens nachgewiesen werden, dass alle Schutzmaßnahmen eine Verbesserung gegenüber dem für den geplanten Zustand ohne Schutzschicht berechneten Szenario des völligen Durchdringens der Überschüttung und Aufschlagen auf der Tunneldecke darstellen.

Bei geradem Auftreffen des Ankers zeigte sich, dass steife Schutzschichten sogar eine Erhöhung der Belastung auf der Tunneldecke bewirken, da infolge der steifen Überdeckung des Überschüttungsmaterials dieses fast nicht mehr die bisher durch Verformungsarbeit absorbierte Energie aufnimmt. Der auf der starren Schutzschicht auftreffende Stoß wird dabei mit nur geringer Dämpfung an das Überschüttungsmaterial und anschließend an die Tunneldecke weitergegeben. Dünnere Schutzschichten hingegen lassen eine Verformung zu, welche dann auch zu Verformungsarbeit im Sand mit entsprechender Energieabsorption führen.

Aus diesem Grund eignen sich nur dünne Stahlplatten als Schutzschicht, allerdings mit einer Ausnutzung von 117 % in Bezug auf die Querkraftbemessung.

Daraus ergibt sich, dass ein optimaler Schutz nur bei Umsetzung der kinetischen Energie in Verformungsarbeit der Überdeckung während des Impakts erreicht werden kann. Es sind daher tendenziell weiche Schutzmaßnahmen zu wählen, welche durch Verformungsarbeit möglichst viel Energie absorbieren.

Da eine daraufhin gewählte Schutzschicht aus quaderförmigen Betonblocksteinen zunächst ein ungünstigeres Ergebnis erbrachte als die oben untersuchte Schutzschicht aus Stahlblech, gleichzeitig aber ein tendenziell vorteilhaftes Verhalten andeutete, wurde eine Schutzschicht aus unten angespitzten Blocksteinen (s. Bild 14) numerisch simuliert. Hierdurch wird bei einem Aufprall die Sandschicht nicht wie im Fall der quaderförmigen Betonblöcke fast ausschließlich vertikal belastet, sondern es wird eine seitliche Verdrängung, evtl. im Zusammenhang mit einem Grundbruch an der verbliebenen Grundfläche (10 cm x 10 cm) erzeugt. Den Fugenspalt zwischen den Blöcken legte man auf 50 mm fest.

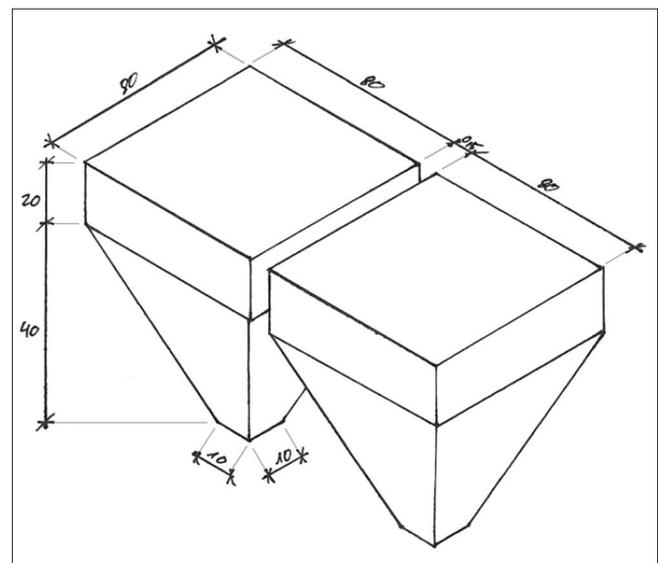


Bild 14: Geometrie der „angespitzten“ Betonblöcke aus (Gebbeken und Linse, 2014)

Figure 14: Geometry of the “pointed” concrete blocks from (Gebbeken and Linse, 2014)

Aufgrund der in den Sand einbindenden Pyramiden kam es zu Problemen bei der Modellierung des Sandes mit SPH-Partikeln, da im verwendeten Programmsystem derart komplexe Geometrieformen nicht modelliert

werden konnten. Es musste daher eine Modellierung des Sandes mit Euler-Elementen erfolgen, deren grundsätzliche Tauglichkeit im vorliegenden Fall durch Vergleichsrechnungen (mit vereinfachter Geometrie) mit SPH-Partikeln weitgehend nachgewiesen werden konnte. Das Modell ist in Bild 15 dargestellt.

Im Gegensatz zu Lagrange-Elementen ist bei Euler-Elementen die Masse nicht an die Netzstruktur bzw. die Elemente gekoppelt, sondern kann durch das Netz hindurchströmen. Die aus der Fluidodynamik entstammenden FE-Methoden mit Euler-Elementen werden daher vor allem zur Abbildung von Strömungsvorgängen oder zur Berechnung der Ausbreitungen von Luftstoßwellen verwendet (Keuser et al., 2012).

Die Simulation ergab deutlich geringere vertikal auf die Tunneldecke einwirkende Druckspannungen, sodass sich nur noch geringe, in ihrem Ausmaß tolerierbare Überschreitungen der Tragfähigkeit ergaben.

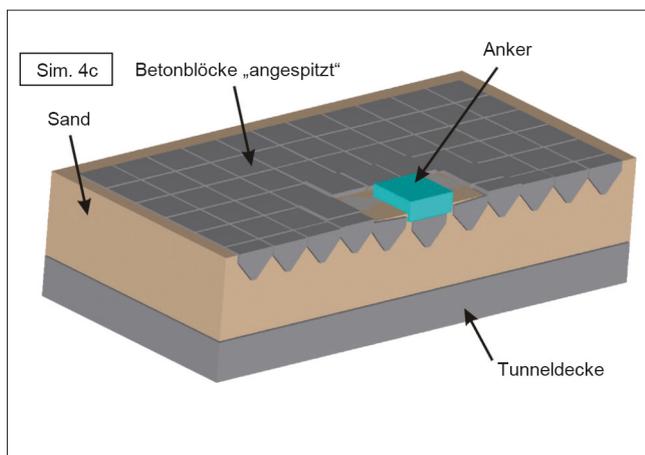


Bild 15: Simulationsmodell zum Nachweis der angespitzten Betonblöcke aus (Gebbeken und Linse, 2014)
 Figure 15: Simulation model for verifying the pointed concrete blocks from (Gebbeken and Linse, 2014)

Entsprechend der Bewertung in (Gebbeken und Linse, 2014) ist die Verwendung von angespitzten Betonblöcken sowohl aus Gesichtspunkten der Standsicherheit als auch der Dauerhaftigkeit geeignet, die Beanspruchung der Tunneldecke durch Ankerwurf so weit zu reduzieren, dass Schäden an der Decke sowie ein Versagen der Tunnelkonstruktion nicht zu erwarten wären.

5 Weiterer Ausblick Outlook

Während die projektbezogene Untersuchung zum Straßentunnel Rendsburg abgeschlossen ist, steht derzeit die Verallgemeinerung der Beanspruchung auf Kreuzungsbauwerke vornehmlich im Binnenbereich noch aus. Speziell sind dies folgende Bearbeitungsschritte:

- Verallgemeinerte numerische Simulationen mit Variation von Überschüttungsdicke, Bodenkennwerten und Auftreffgeschwindigkeit,
- Verifizierung bzw. Kalibrierung der Simulationen durch großmaßstäbliche Versuche,
- Auswertung der Versuche und Entwicklung des allgemeinen Berechnungsansatzes.

Ergänzungsbedarf in der bisherigen Bearbeitung wird in den Ankerwurfversuchen an nur vier Schiffen gesehen, welche letztendlich als Grundlage zur Herleitung der Gleichung für die Ankerfallgeschwindigkeit im Wasser dienten. Für eine repräsentative Auswahl ist die Anzahl der Schiffe zu gering, was jedoch den vorhandenen bzw. möglichen zeitlichen und finanziellen Ressourcen geschuldet war. Es wäre daher wünschenswert, bei Gelegenheit die Ankerwurfversuche entsprechend zu ergänzen zur Erzielung eines größeren Vertrauensniveaus.

In einem Folgevorhaben sollen die ausstehenden Punkte bearbeitet und das Gesamtvorhaben zum Abschluss gebracht werden.

6 Literatur References

Aeromarine Equipments Supply Pvt, Ltd (2009): http://www.aeromarineindia.com/products/anchors_chains.htm, Mumbai, Indien.

American Bureau of Shipping (2013): Guidance Notes on: Accidental Load Analysis and Design for Offshore Structures, Eigenverlag, Houston.

Det Norske veritas (2010a): Recommended practice DNV-RP-C204: Design against accidental loads.

- Det Norske veritas (2010b): Recommended practice DNV-RP-F107: Risk assessment of pipeline protection. by ship anchors by means of asphalt mattresses. 10th International Harbour Congress, Antwerpen.
- de Vries S. B. (1988): Ships and tunnels: Particular Loads. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 3, No. 4, pp. 369-373. Wortelboer (2015): <http://www.wortelboer.nl/products/?c=12>, Rotterdam, Niederland.
- Eibl J.; Henseleit O.; Schlüter F.-H. (1988): Baudynamik. Betonkalender 1988, Teil II, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- Gebbeken N.; Linse T. (2009): Gutachten Nr. G 090601 „Ankerwurf im Nord-Ost-See-Kanal über dem Straßentunnel Rendsburg“, Eigenverlag, Neubiberg.
- Gebbeken N.; Linse T. (2014): Ergänzungsgutachten „Optimierung der Schutzüberdeckung aus Betonblocksteinen gegen Ankerwurf“, Eigenverlag, Neubiberg.
- Germanischer Lloyd (2012): Klassifikations- und Bauvorschriften des Germanischen Lloyd: I Schiffstechnik, 1 Seeschiffe, 2 Schiffskörper, Hamburg.
- Keuser M.; Gebbeken N.; Linse T.; Wensauer R. (2012): Betonstrukturen unter Explosion und Impakt. Betonkalender 2012, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- Rabe D. et al. (1989): Planung und Ausschreibung des Emstunnels bei Leer. Bauingenieur 64, Springer-Verlag.
- Seacat – Schmeding International GmbH (2011): <http://www.seacat-schmeding.com/en/anchors.html>, Hamburg.
- van Aanhold, J. E.; Hoiseth K.; Nauta P.; Raijmakers, T. M. J.; Vrouwenfelder, A. C. W. M. (1995): Literatuurstudie vallend anker op tunneldak. TNO-rapport 95-WEC-R0845, TNO Bouw, Delft.
- Vrouwenfelder, T.; Krom, A.; Weerheim, J.; Hoeksma, J.; Høj, N. P.; Schepper, L. (2004): Identification and quantification of hazards, Durable and reliable tunnel structures DARTS R4.1.
- Vryhof anchors (2005): Vryhof anchor manual, Krimpen ad Yssel, Niederlande, 2005.
- Wens, F.; Meyvis, L.; van Eerdenbrugh, C.; de Saint Aubain, G.; Pauwels, W.; Elskens, F. (1992): Liefkenshoek-tunnel, Protection of the tunnel against damage caused