

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

## Schäfers, Matthias; Allgäuer, Frank Schleusenkammer in Brunsbüttel

Deutsche Beiträge. Internationaler Schifffahrtskongress (PIANC)

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:  
**PIANC Deutschland**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107217>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Schäfers, Matthias; Allgäuer, Frank (2018): Schleusenkammer in Brunsbüttel. In: PIANC Deutschland (Hg.): Deutsche Beiträge. 34. Internationaler Schifffahrtskongress; Panama City, Panama, 07. - 11. Mai 2018. Bonn: PIANC Deutschland. S. 22-37.

### Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



## 5. Schleusenammer in Brunsbüttel

### 5. Schleusenammer in Brunsbüttel

von Dr. Matthias Schäfers<sup>1</sup> und Frank Allgauer<sup>2</sup>

#### 1. Allgemeines

Die 5. Schleusenammer in Brunsbüttel (kurz: 5SKB) befindet sich am nordseeseitigen Eingang des Nord-Ostsee-Kanals. Der Kanal spielt aus verkehrlicher Sicht eine große Rolle für den Ostseeraum sowie die Nordseehäfen (Brunsbüttel, August 2016). Dabei handelt es sich, gemessen an der Zahl der querenden Schiffe, um die verkehrsreichste künstliche Wasserstraße der Welt. Aufgrund der Verkehrsströme von den Nordseehäfen zur Ostsee kommt der Schleuse auch besondere wirtschaftliche Bedeutung zu.

Aktuell hat die Schleusenanlage in Brunsbüttel 4 Schleusenammern. Zunächst waren zwei Schleusenammern mit je 24 m breiten Stemmtoren gebaut worden, die jedoch schnell um zwei weitere Schleusenammern mit jeweils 46 m breiten

Schiebetoren ergänzt wurden (tatsächlich nutzbare Breite: 42 m). Seit ihrem Bau (1914) sind diese Schleusen nicht mehr grundinstandgesetzt worden. Aufgrund der starken Auslastung und dem umfassenden Bedarf an Wartungs- und Reparaturarbeiten ist es nicht möglich, die vorhandenen Schleusen während des Normalbetriebs zu sanieren. Aus diesem Grund muss eine zusätzliche Schleusenammer für die Zeit der Grundinstandsetzung zur Verfügung gestellt werden, um die vorhandenen Kapazitäten aufrechtzuerhalten. Dies macht den Bau einer 5. Schleusenammer notwendig. Nach der Grundinstandsetzung der vorhandenen Schleusenammern wird die Schleusenkapazität im Vergleich zum aktuellen Stand größer sein. Die Maße der neuen Schleusenammer wurden an die beiden vorhandenen großen Schleusen angepasst.

Neben der Funktion als Schleusenammer ist die Bauweise auch wegen des Hochwasserschutzes sowie der Trockenlegung der Schleuse eine Herausforderung. Die Bauweise ist von diesen beiden, teils widersprüchlichen, teils sich ergänzenden Anforderungen geprägt.

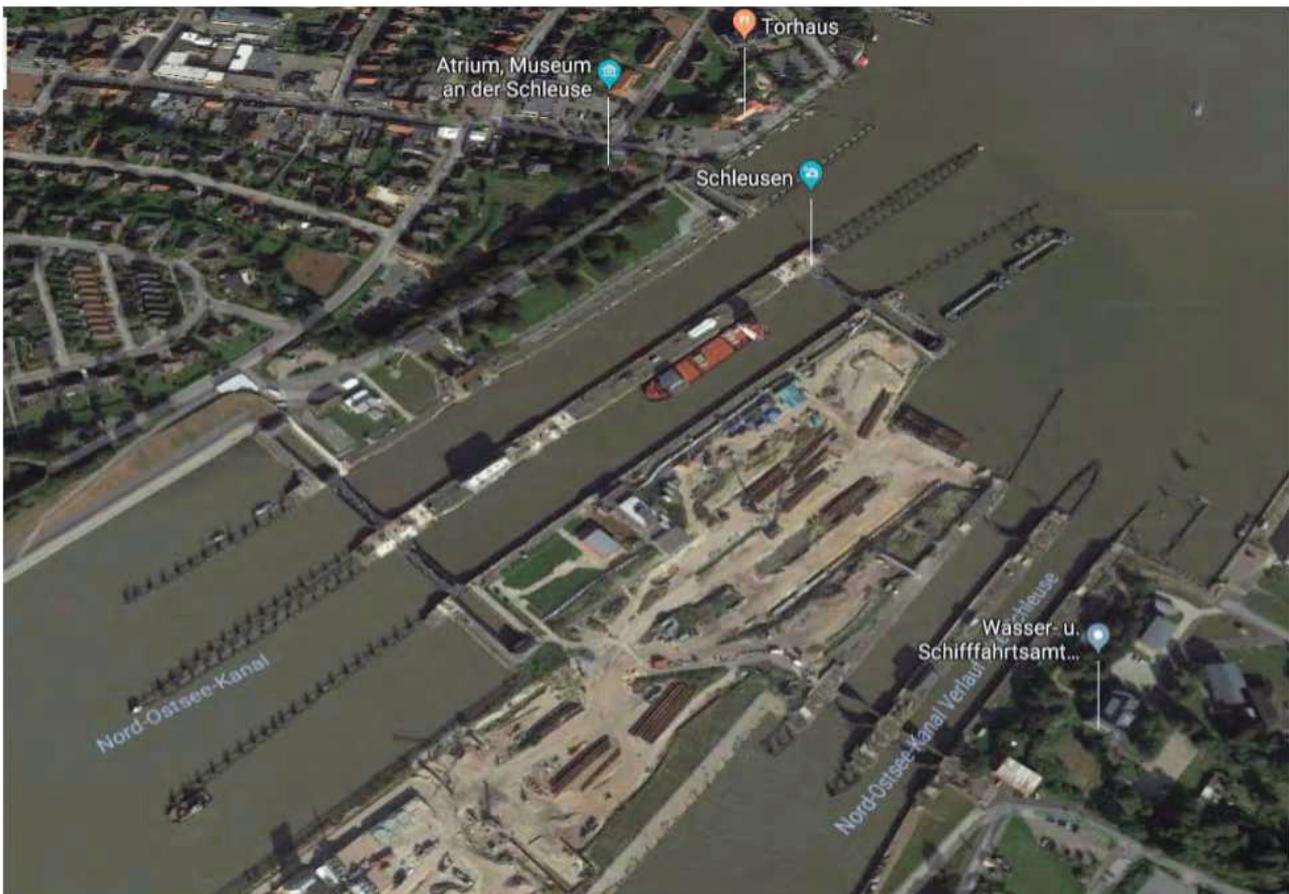


Abbildung 1-1 Blick auf Brunsbüttel (Quelle: Google Maps)

- 1 Dr. Matthias Schäfers, IRS Stahlwasserbau Consulting AG, Deutschland
- 2 Frank Allgauer, IRS Stahlwasserbau Consulting AG, Deutschland

## 5. Schleusenammer in Brunsbüttel

In Anbetracht der benötigten Schleusenverfügbarkeit und der relativ großen Anzahl paralleler Schleusen mit gleichen Maßen konnte die Reaktionszeit so gewählt werden, dass kein zweites Tor konstant an jedem Schleusenhaupt betriebsbereit sein muss. Dies wird die Investitionskosten senken. Nur Lagerbereiche müssen für die gewählte Anzahl der Ersatztore zur Verfügung stehen. Zudem wird aktuell der Bau eines Trockendocks geplant. An die Fahrsysteme und die Toroberwagen werden ähnliche Redundanzanforderungen gestellt wie an die Tore, mit denen dem Ausfall einer Schleusenammer vorgebeugt wird.

Aufgrund dieser unterschiedlichen Anforderungen sind Seeschleusen sehr komplex in ihrer Bauweise. Kernelement dieser Systeme und sogar noch komplexer sind die Schleusentore mit Ballast- und Lenzsystemen, die großen Einfluss auf die Gesamtfunktion der Schleuse haben. In diesem Fall haben die Schleusen ein integriertes Ballastsystem. Es handelt sich um ein Bauwerk aus den Bereichen Ingenieur- und Maschinenbau sowie Schiffbau.

Brunsbüttel liegt an der Mündung der Elbe zur Nordsee, am westlichen Ende des Nord-Ostsee-Kanals. In diesem Bereich der Elbe herrschen starke Gezeiten, einschließlich einer hohen Belastung durch Schlick. Die Schleuse liegt auf einer Schleuseninsel am Eingang zum Nord-Ostsee-Kanal. Der Platz auf dieser Insel ist sehr begrenzt; die Lage der Schleuse und vor allem der querlaufenden Ausdehnung aller Bauteile, einschließlich der Antriebe, musste optimiert werden.

In diesem Artikel kann nur auf einige der Herausforderungen im Zusammenhang mit dieser Art von Schleusentoren eingegangen werden.

### 2. Auswahl des Entwurfs

Für die 5SKB wurden Schiebetore gewählt, die nach der Grundinstandsetzung der vorhandenen Schleusenammern in der großen Schleuse auch dort verwendet werden können. Deshalb wurde das bereits in den vorhandenen Schleusen verwendete Schubkarrensystem gewählt. Ein Torunterwagen sowie ein Toroberwagen wurden für das Schiebetor entworfen. Es müssen also nur ein Torunter- und -oberwagen, mit dem gleichen Verbindungssystem und einem Schienensystem wie für die neue Schleusenammer auch für die alte Schleuse gebaut werden, damit die Tore nach der Instandsetzung problemlos auch in den alten Schleusenammern verwendet werden können. So kann auf Ersatztore verzichtet und die Instandhaltung standardisiert werden. Die Investitionskosten für zusätzliche Torkammern und Antriebe können dementsprechend gespart werden.

Die Tore der 5SKB wurden in schwimmender Bauweise entworfen. Ein Grund dafür ist ein vereinfachter Austausch der Schiebetore. Für den Zusammen- und Abbau werden die Tore mit dem bereits erwähnten Ballast- und Lenzsystem zum Schwimmen gebracht. Grundvoraussetzung für den Zusammenbau (und den Ausbau) der Tore ist ein ausreichendes Aufschwimmen der Unterseite der Tore, sodass diese über den Unterwagen geschwenkt

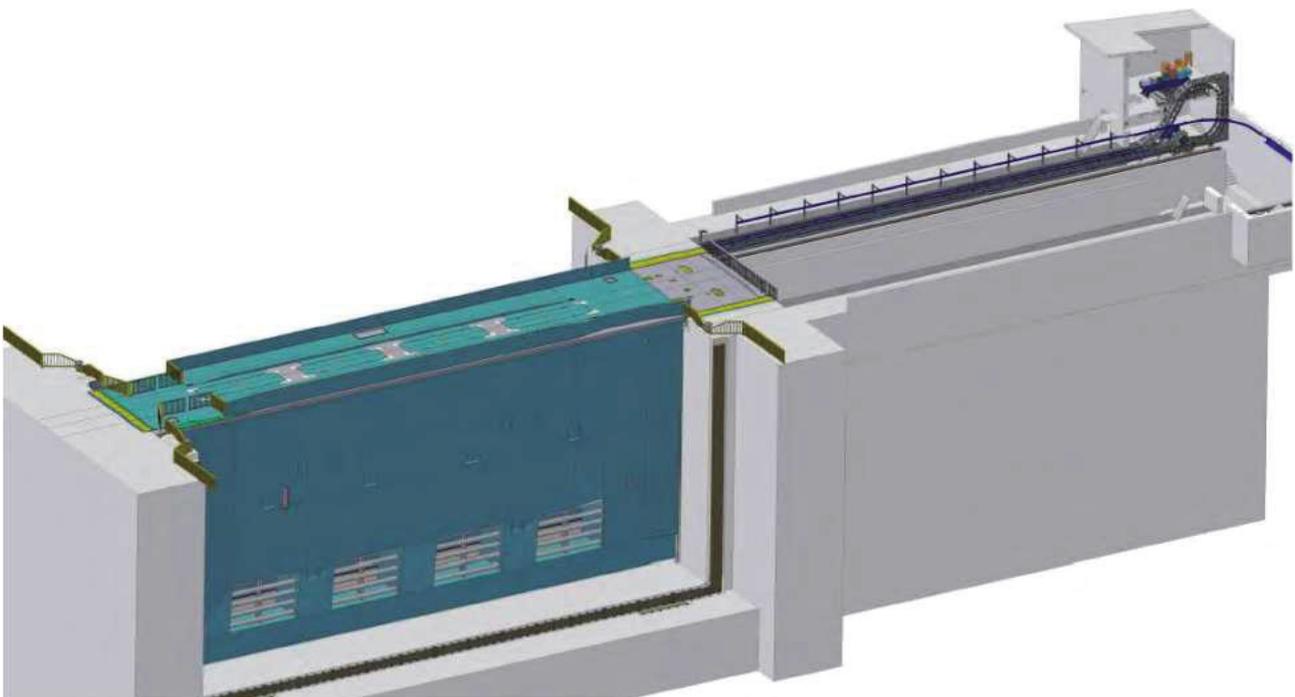


Abbildung 2-1 Darstellung eines geschlossenen Schiebetors

## 5. Schleusenammer in Brunsbüttel

werden können (Nutzen der Ballastfunktion sowie der Gezeiten) und eine rotierende Schwenkbewegung um die Torkammer durchgeführt wird. Berücksichtigt man die Toleranzen bei der Herstellung von Stahl- und Betonbauten sowie die zulässigen Krümmungs- und Trimmwerte, so sind einige Zentimeter Platz ausreichend, um die Tore einzusetzen.

Die Tore werden nur von Schleppern, wie oben beschrieben, bewegt, sodass sie mit geringen Kosten eingebaut werden können, ohne Spezialkräne nutzen zu müssen. Das Ersatztor verbleibt bis zum nächsten Einsatz auf Dalben. Für die Grundinstandsetzung bietet sich ein Trockendock an, da es mehr Platz als die Torkammern bietet und alle notwendigen Geräte zur Verfügung stehen, um die Wartung und Reparatur deutlich zu vereinfachen. Die Tore können mit den Schleppern leicht von einem Ort zum anderen gebracht werden. Aufgrund der Mobilität der Tore kann eine zweite Torkammer vermieden werden.

Wegen der Gesamtheit der Anforderungen an die Tore sind die neuen Tore schwerer als früher. Im Gegensatz zu den Bestandstoren der Brunsbütteler Schleuse werden die neuen Tore mit Füllungs- und Entleerungsschützen ausgerüstet, was sie schwerer macht. Durch Füllschütze im Tor kann die Wartung vollkommen unabhängig vom Schleusenbetrieb erfolgen (z. B. in einem Trockendock).

### 3. Belastung

Das Tor ist unterschiedlichen Einflüssen ausgesetzt, die weitestgehend in DIN 19704 zusammengetragen sind. Wichtig sind hier vor allem Eigengewicht, äußerer Wasserdruck, Ballastwasser, aber auch Verkehrslast auf den Fahrweg. Im Folgenden werden nur einige Besonderheiten der Belastung für die Schiebetore erläutert.

#### 3.1 Ermüdung

In der 5SKB sollen 17 Doppelschleusenvorgänge pro Tag möglich sein. Der Doppelschleusenvorgang wird in Abbildung 3-1 dargestellt.

Die Nordsee ist stark von Gezeiten geprägt. Der Nord-Ostsee-Kanal hat einen gleichbleibenden Wasserstand von etwa  $\pm 0,00$  m über dem Meeresspiegel. Der Tidenhub der Nordsee liegt bei  $\pm 3,00$  m. Das Tor wird bei etwa gleichbleibenden Wasserständen im Kanal und bei schwankenden Wasserständen in der Nordsee bewegt. Der Wasserstand in der Schleusenammer wird mit jedem Schleusenvorgang an den Wasserstand in der Nordsee oder im Nord-Ostsee-Kanal angepasst. Das Außenhaupt ist immer dem Wasserdruck ausgesetzt, der sich mit den Gezeiten einstellt. Im Nord-Ostsee-Kanal ist der Wasserstand annähernd konstant. In den Schleusenammern ändert sich der Wasserstand mit jedem Schleusenvorgang von dem einen zum anderen Wasserstand. Die Tore können nur geöffnet oder geschlossen werden, wenn der Wasserstand am zu bewegenden Tor etwa ausgeglichen ist.

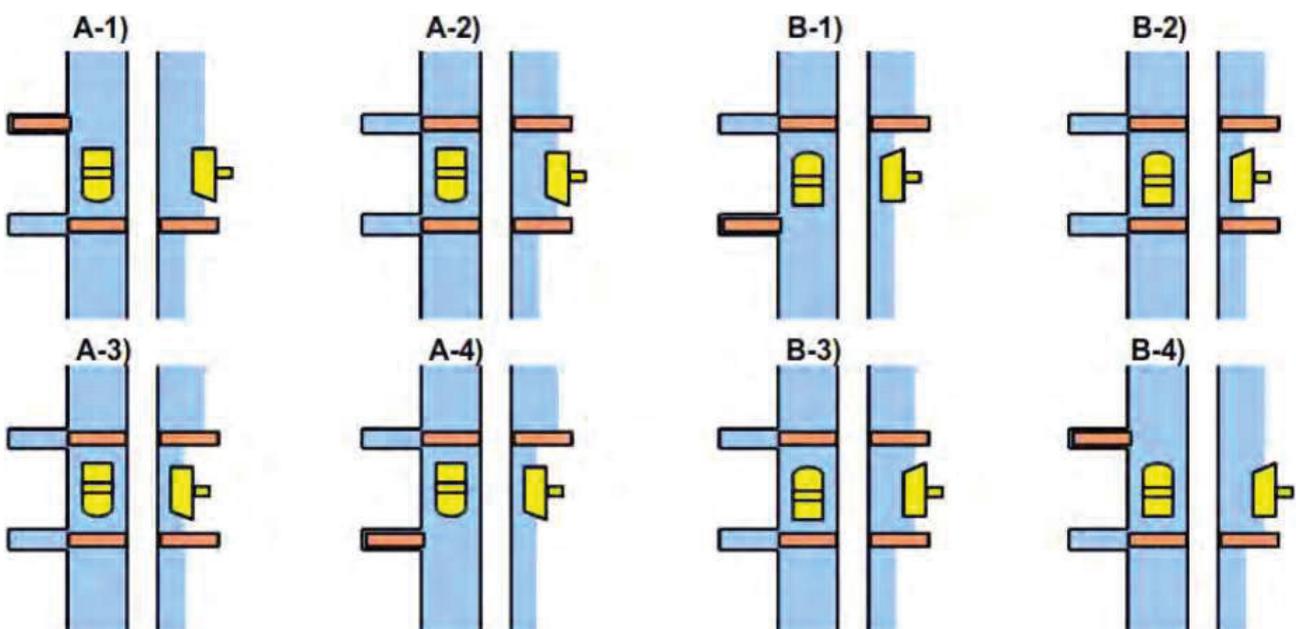


Abbildung 3-1: Definition eines Doppelschleusenvorgangs (A - Schleusenvorgang vom Nord-Ostsee-Kanal zur Elbe; B - Schleusenvorgang von der Elbe zum Nord-Ostsee-Kanal)

## 5. Schleusenammer in Brunsbüttel

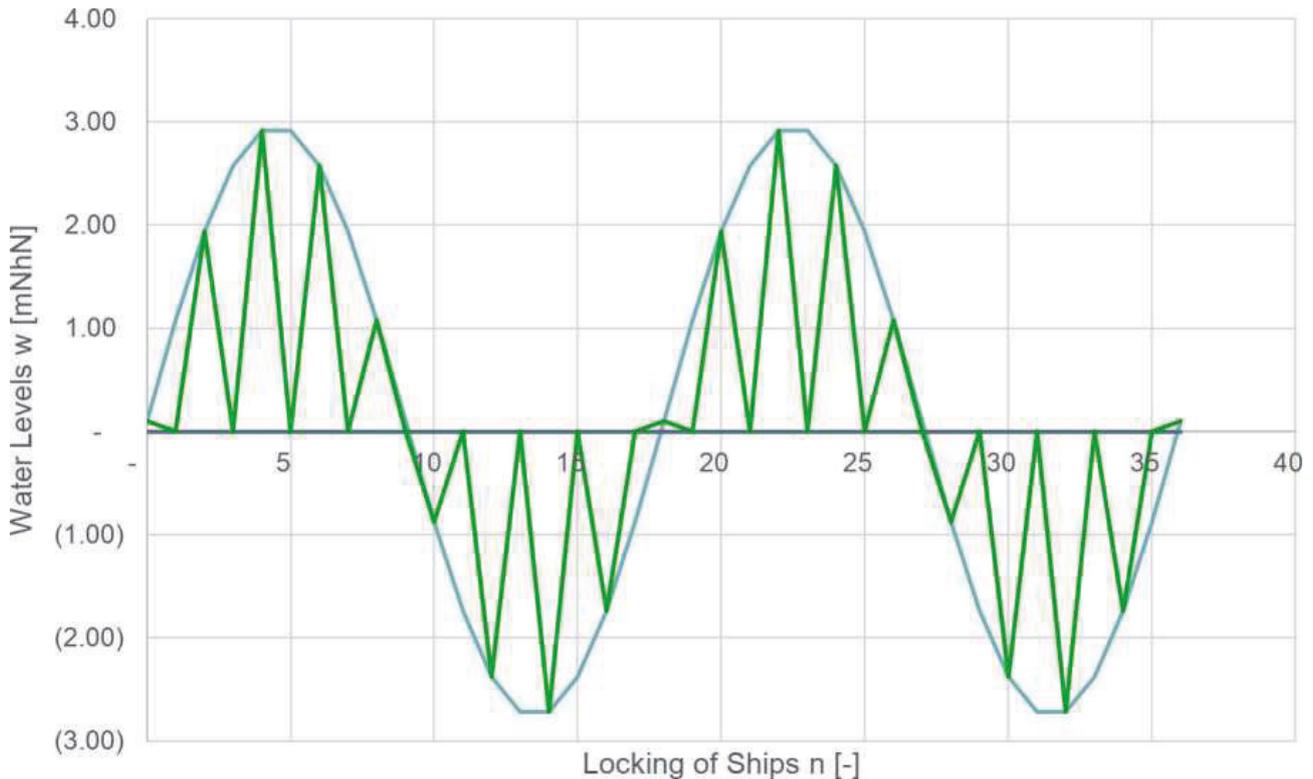


Abbildung 3-2: Darstellung der Gezeitenabfolge über einen Tag (17 Doppelschleusenvorgänge)

Abbildung 3-2 zeigt die Gezeitenfolge während eines Tages. Die Gezeitenfolge wurde näherungsweise mit einer Sinuskurve beschrieben, was für die Zwecke dieser Untersuchung ausreichend genau ist. Es wird angenommen, dass die Gezeitenfolge mit der Länge eines Tages übereinstimmt. Diese Vereinfachung hat nur geringe Auswirkungen auf das Untersuchungsergebnis, macht die Ergebnisse jedoch leicht konservativer.

Die Wasserstandsänderungen, die horizontal auf das Tor einwirken, verhalten sich affin zur Gezeitenfolge. Dies führt zu Ermüdungsbelastungen für die Tore durch die täglichen Gezeitenfolgen und die unterschiedlichen Lastzustände durch das Öffnen und Schließen der Tore bestimmt sind. Die Annahme, dass der größte Lastunterschied die Ermüdungsbelastung darstellt, führt zu unwirtschaftlichen Ergebnissen. Es wäre auch unwirtschaftlich, alle Wasserstandsunterschiede einzeln zu berechnen, sie an allen relevanten Stellen auszuwerten und sie im Entwurf zu optimieren. Dies würde den Entwurfsprozess deutlich verlängern. Auch die Auswertung des Mittelwerts wäre nicht sicher, da laut Wöhler hohe Belastungen zu überproportional hohem Schaden führen. Um jedoch einen reduzierten schadensäquivalenten und dennoch konservativen Wasserstand als Eingangswert zur FE-Berechnung zu berechnen, kann die Schadenshypothese nach Palmgreen-Miner ausgewertet werden (DIN-EN-1993-1-9; 2005).

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

Die gegebenen Lastunterschiede  $n$  resultieren aus der Häufigkeit der Schleusungen. Die Schleusenvorgänge an der 5SKB sind gleichmäßig über den Tag verteilt und größtenteils unabhängig von den Gezeiten. Somit treten beispielsweise keine Effekte dadurch auf, dass Schleusenvorgänge nur bei hohem Wasserstand durchgeführt werden. Dies führt zu einer typischen Anzahl von Lastzyklen für jede Druckhöhe des Wassers. Die ertragbaren Lastzyklen  $N$  resultieren aus den gegebenen Kerbklassen und der Belastung gemäß der Wöhlerlinien.

$$D = \sum_{i=0}^k \frac{n_i}{N_{Rd,i}} = \frac{n_1}{N_{Rd,0}} + \frac{n_2}{N_{Rd,1}} + \dots = \frac{k \cdot n_d}{N_{Rd,\bar{A}}} \quad (2)$$

Die genaue Berücksichtigung von Ermüdungsbelastungen an allen spezifischen Kerben in Verbindung mit der zum Stahlwasserbau passenden Duktilität könnte dazu beitragen, Risse im Bauwerk zu vermeiden (vor allem Risse aufgrund von Ermüdung und Sprödbruch).

## 5. Schleusenkammer in Brunsbüttel

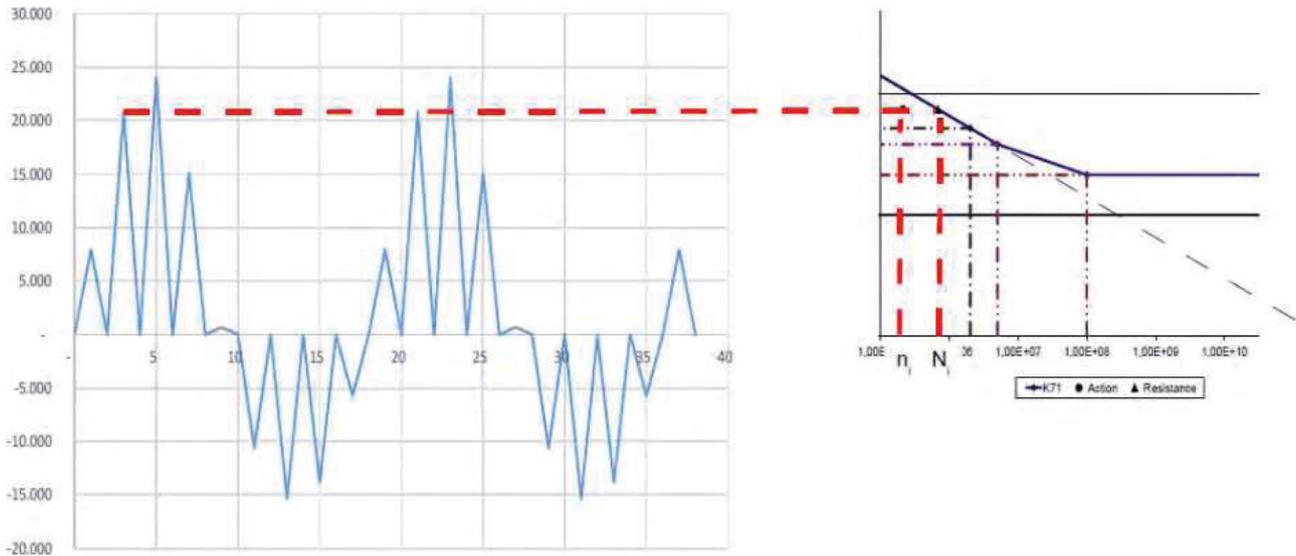


Abbildung 3-3 Schematischer Vergleich der Unterschiede der Wasserstände zu Wöhler-Kurven

### 3.2. Höchstbelastung durch Wellen

Eine weitere Funktion der Schiebetore ist der Hochwasserschutz. Die Schleuse ist ein integraler Bestandteil der Hochwasserschutzlinie entlang der Nordseeküste. Sturmfluten können laut Vorhersagen Höhen von etwa + 8,88 m über dem Meeresspiegel erreichen. Der Bemessungshochwasserstand beträgt + 7,00 m über dem Meeresspiegel. Die Erhöhung der Festlegung des Wasserstands und daraus resultierend der Bordwand (auf + 7,60 m über dem Meeresspiegel) berücksichtigt die Folgen des Klimawandels.

In Anbetracht des zu erwartenden Anstiegs des Meeresspiegels wird der obere Teil des Tors nur von Wellen belastet. Während eines Hochwassers könnte beispielsweise Wasser durch Undichtigkeiten auch in den Nord-Ostsee-Kanal gelangen. Das durch Wellen in den Nord-Ostsee-Kanal eingetragene Wasser wird zu keinem zu beachtenden Anstieg des Wasserstands führen. Aus diesem Grund wurden die Dichtigkeitsanforderungen für die Bereiche, in denen nur Wellen auftreten, gesenkt.

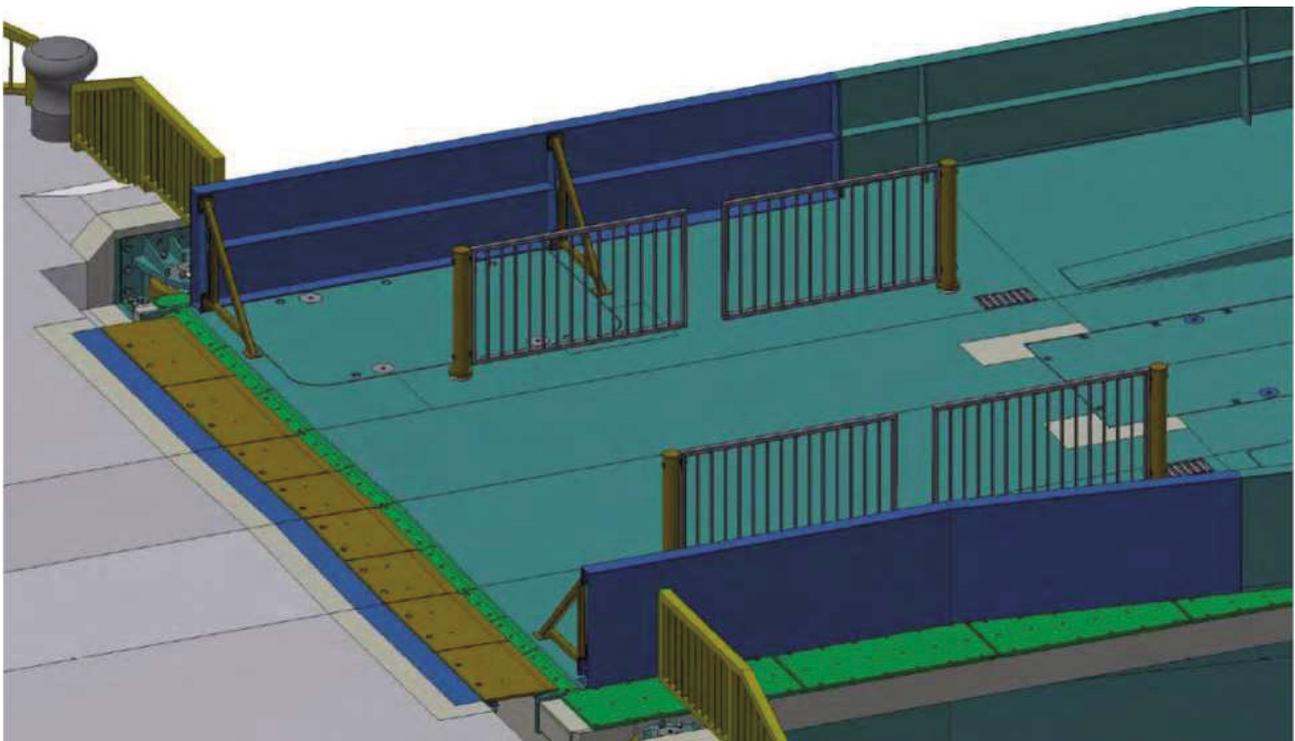


Abbildung 3-4 Hochwasserschutz, Bodenwand des Tors erhöht

## 5. Schleusenammer in Brunsbüttel

Die Entwurfsanforderungen ergaben sich aus einem Wellengutachten. Da DIN 19704 keine Anforderungen bezüglich Wellenbelastungen stellt, werden die EAU dafür herangezogen. Der Ansatz ist für große Tore konservativ, da sich große Schleusento-

re deutlich stärker verformen als Dämme, weswegen Stoßkräfte in niedrigerer Höhe wirken. Daraus ergeben sich die folgenden Beladungszustände für die Schiebetore.

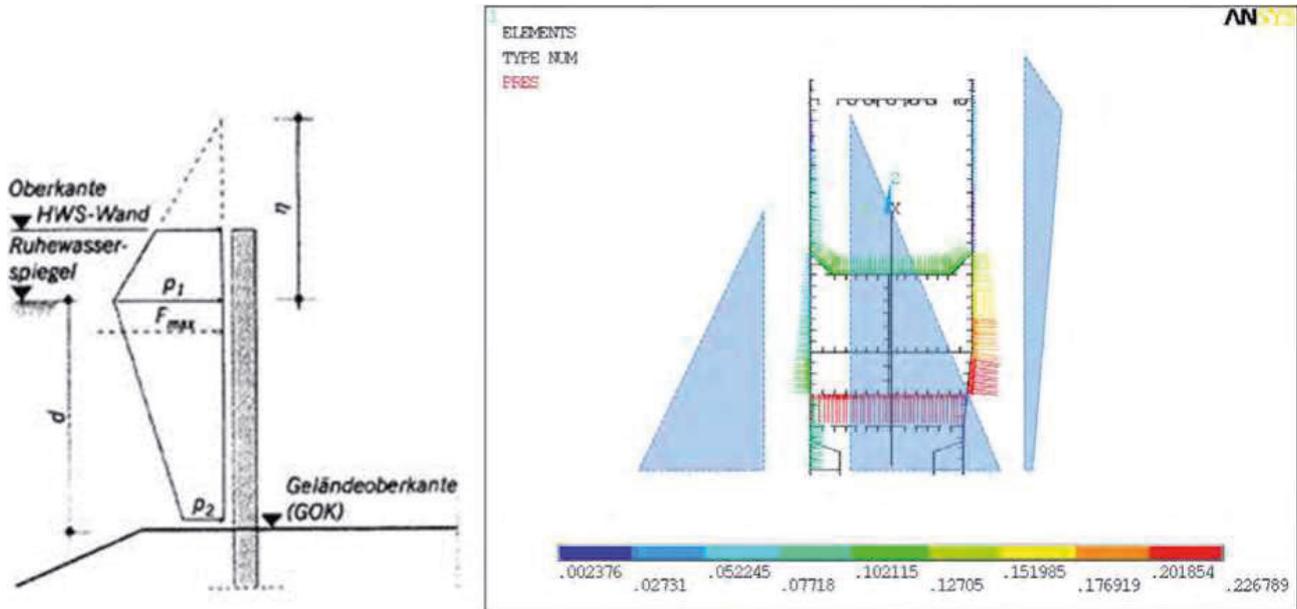


Abbildung 3-5 Wellenbelastung (links) und Umsetzung in der Berechnung (rechts)

### 4. Entwurfsanforderungen und Anforderungen aufgrund der Auslegung, Interaktionen und Auswirkungen

Seit dem Bau der großen historischen Schleusen im Jahr 1914 haben sich die Herstellungsmethoden, Sicherheitsanforderungen (z. B. Entwurfsplanung) und sozialen Anforderungen wie etwa Arbeitsschutz bedeutend geändert. Obwohl die grundlegenden Dimensionen gleich geblieben sind, führt dies zu vollkommen anderen Detaillösungen. Beispiele für Anforderungen und ihre Interaktionen werden im Folgenden beschrieben.

#### 4.1. Sicherheitsanforderungen vs. Schwimmtiefe

Aufgrund steigender Schadenswerte bei Ausfällen verlangt die Gesellschaft nach zunehmend großer Verfügbarkeit und somit Sicherheit für tragende Bauwerke, Vorgänge, usw. (Schneider & Schlater, 2007). Höhere Sicherheit erfordert eine robustere Auslegung von Bauwerken. Ermüdung wurde für die alten Tore der Brunsbütteler Schleuse beispielsweise nicht untersucht. Aus diesem Grund sind viele Bauwerke schwerer als in der Vergangenheit.

Bei einem Schiebetor verhält sich das zusätzliche Gewicht proportional zur Verteilung des Gesamtgewichts, da alle Teile des Tors in einer ersten Annä-

herung gleichermaßen betroffen sind. Die zusätzliche Masse kann nur mit zusätzlichen Auftriebzellen ausgeglichen werden, um die maximal mögliche Schwimmtiefe zu erreichen und die Stützlasten optimal auf die tragenden Bauwerksteile zu verteilen (Torunter- und -oberwagen). Soll die Schwimmtiefe der Tore gleich bleiben, kann aufgrund der oben beschriebenen Massezunahme zusätzlicher Auftrieb oft nur durch Auftriebzellen erreicht werden, die im unteren Teil des Tors angebracht werden. Dies beeinträchtigt wiederum die Schwimmstabilität, was nur mit Ballast an der Unterseite des Tors ausgeglichen werden kann. Dieser zusätzliche Ballast macht wiederum mehr Auftrieb notwendig, das heißt, das System auf die allgemeinen Auslegungsbedingungen sensibel reagiert; siehe auch Abschnitt 4.3.3 Schwimmstabilität.

#### 4.2. Arbeitsschutz vs. Auftriebssicherheit

Ein Ergebnis veränderter Arbeitsschutzanforderungen ist, dass alle Zugänge breiter und weniger geneigt sein dürfen als früher. Infolgedessen benötigen Zugänge zu Maschinenräumen deutlich mehr Platz. Da Treppen (als Hohlkörper) den Auftrieb mit steigendem Wasserspiegel immer erhöhen, steigt der Gesamtauftrieb des Schiebetors, je größer die Treppen sind. Bei alten Toren führen lediglich Leitern zu den Maschinenräumen.

## 5. Schleusenkammer in Brunsbüttel

Ein Materialschacht mit ähnlichen Ausmaßen zum Herablassen von fertig zusammengesetzten Teilen in den Maschinenraum im Tor wird benötigt. Mit

einem mobilen Davitkran kann dieser Schacht auch genutzt werden, um Verletzte aus dem Maschinenraum zu bergen.

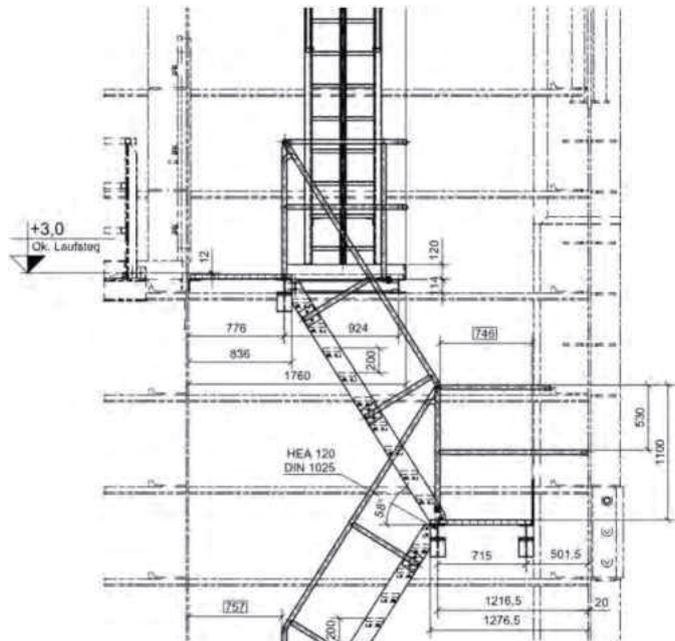
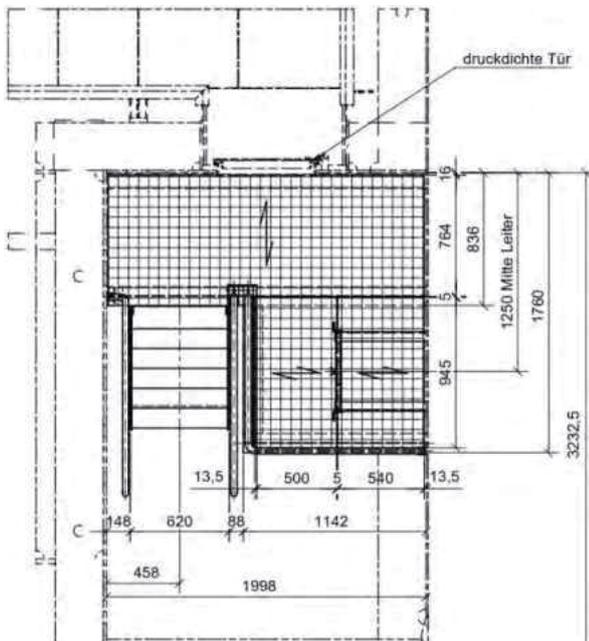


Abbildung 4-1 Treppenaufbau, Querschnitt

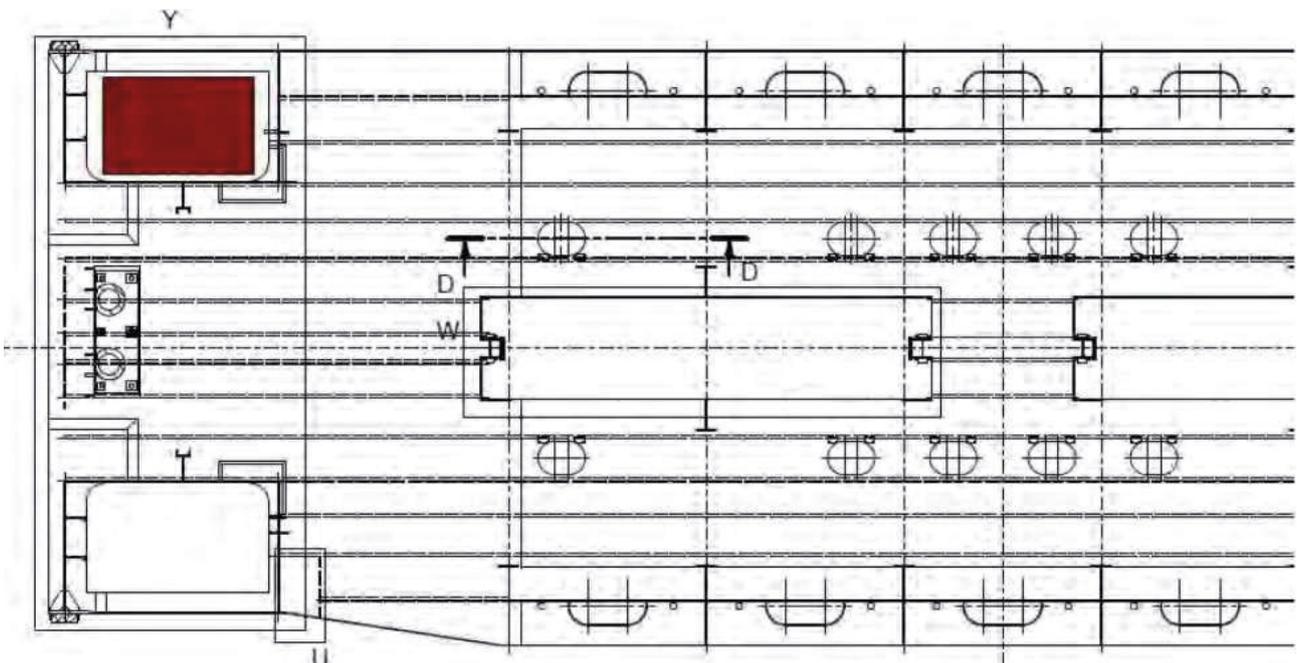


Abbildung 4-2 Materialschacht mit maximalen Transportgrößen

Der zuvor beschriebene zusätzliche Auftrieb hat eine negative Auswirkung auf die Auftriebssicherheit des Tors während des Betriebs. Es muss sichergestellt werden, dass das Tor nicht aufzuschwimmen beginnt, unabhängig von der Höhe des äußeren Wasserstands. Der zusätzliche Auftrieb macht deshalb zusätzlichen Ballast notwendig, damit sichergestellt ist, dass das Tor nicht aufschwimmt. Dieser zusätzliche Ballast wird nur teilweise vom höheren

Bauwerksgewicht des Tors ausgeglichen (vgl. Abschnitt 4.1). Der darüber hinaus benötigte Ballast kann variabel durch das Ballast- und Lenzsystem eingebracht werden. Um die Schwimmstabilität zu verbessern, kann der zusätzliche Ballast auch in Form von permanentem Ballast hinzugefügt werden, etwa durch schweren Beton am Boden des Tors, vgl. Abbildung 4-3.

## 5. Schleusenammer in Brunsbüttel

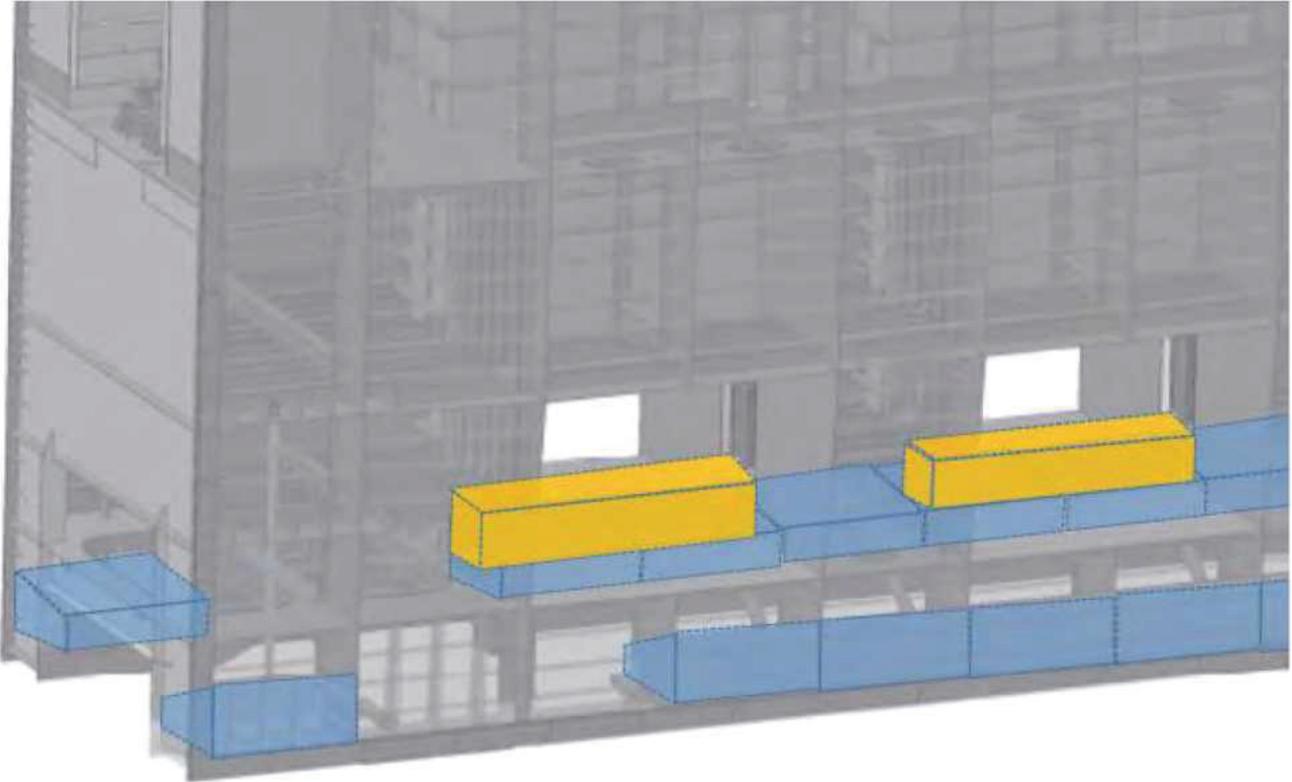


Abbildung 4-3 Identifizierung von Hohlräumen für permanenten Ballast (blau: methodisch genutzt / orange: Planungsreserve)

Die Treppen wurden in den Ecken angebracht, um für maximale Stabilität beim Einbau und Senken der Tore zu sorgen (analog beim Einbau und Ausschwimmen), siehe Abbildung 4-4. Aufgrund der

hohen Steiner'schen Anteile der Treppenschächte beim Eintauchen der Tankdecke ins Wasser bleibt das Tor deutlich stabiler als vergleichbare Tore mit zentral eingebauten Treppen.

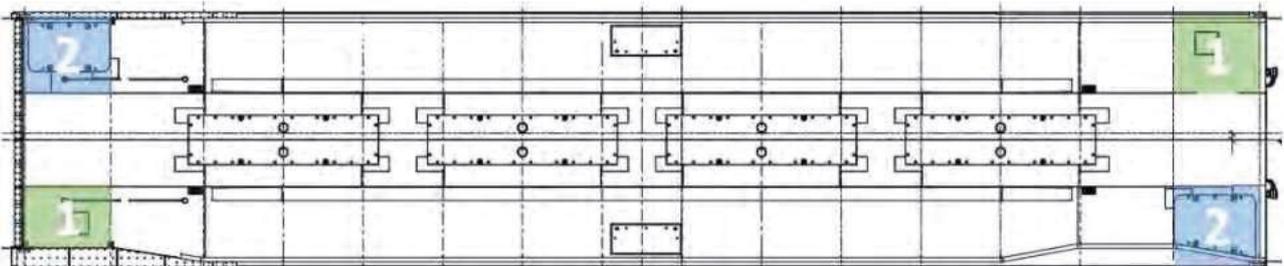


Abbildung 4-4 Blick auf das Schiebetor (1 - Treppe / 2 - Treppe in der Ecke)

### 4.3. Schwimmigenschaften

Die Schwimmigenschaften haben Einfluss auf einige bedeutende Parameter der Konstruktion; die Konstruktion wiederum hat auch Einfluss auf die Schwimmigenschaften. Die Schwimmigenschaften können grundsätzlich nach den folgenden Parametern unterschieden werden.

#### 4.3.1. Schwimmtiefe

Grundsätzlich hat die Schwimmtiefe eine Untergrenze. Das liegt beispielsweise an den Bedingungen für Ein- und Ausbau (das Tor muss über dem Dremmel und dem bereits eingebauten Torunterwagen schwimmen), aber auch daran, dass alle Bereiche in der Nähe der Schleuse bei zuvor festgelegten Wasserständen erreicht werden müssen. Die Schwimmtiefe unter Berücksichtigung der Gezeiten bestimmt somit den Zeitraum, in dem das Tor mit zuvor definiertem Mindestabstand über dem Torunterwagen abgesenkt werden kann. Sobald das Tor über den Torunterwagen geschwenkt wurde, muss der Mindestabstand nicht mehr eingehalten werden.

## 5. Schleusenkammer in Brunsbüttel

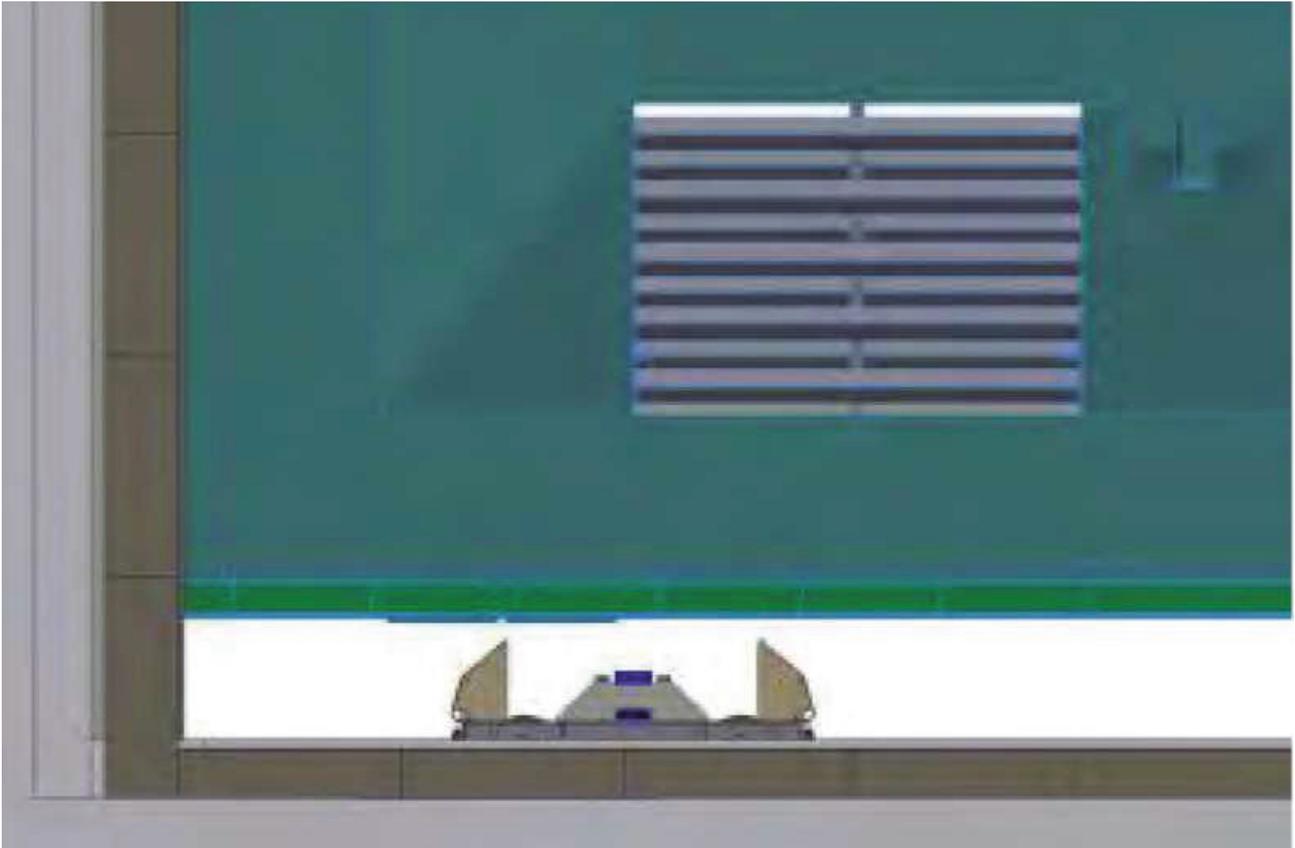


Abbildung 4-5 Darstellung eines über dem Torunterwagen schwimmenden Tors

Die Zeit, die für die Installation des Tors durch Schlepper über dem Torunterwagen verbleibt, kann anhand der Gezeitengeschwindigkeit festgelegt werden. Der Prozess des Einschwenkens sollte mit Beginn der Flut beginnen.

Zwei zusätzliche Hebepontons sind für das 5SKB-Projekt eingeplant. Die Hebepontons können ohne

zusätzliche Großgeräte am schwimmenden Schiebetor angebracht werden. Die Hebepontons sorgen für zusätzlichen Auftrieb und reduzieren dadurch die Schwimmtiefe des Tors. Zudem ist die Schwimmstabilität der Kombination aus Tor und Ponton deutlich höher als des schwimmenden Tors als solches. Auf die Hebepontons wird in diesem Artikel nicht weiter eingegangen.

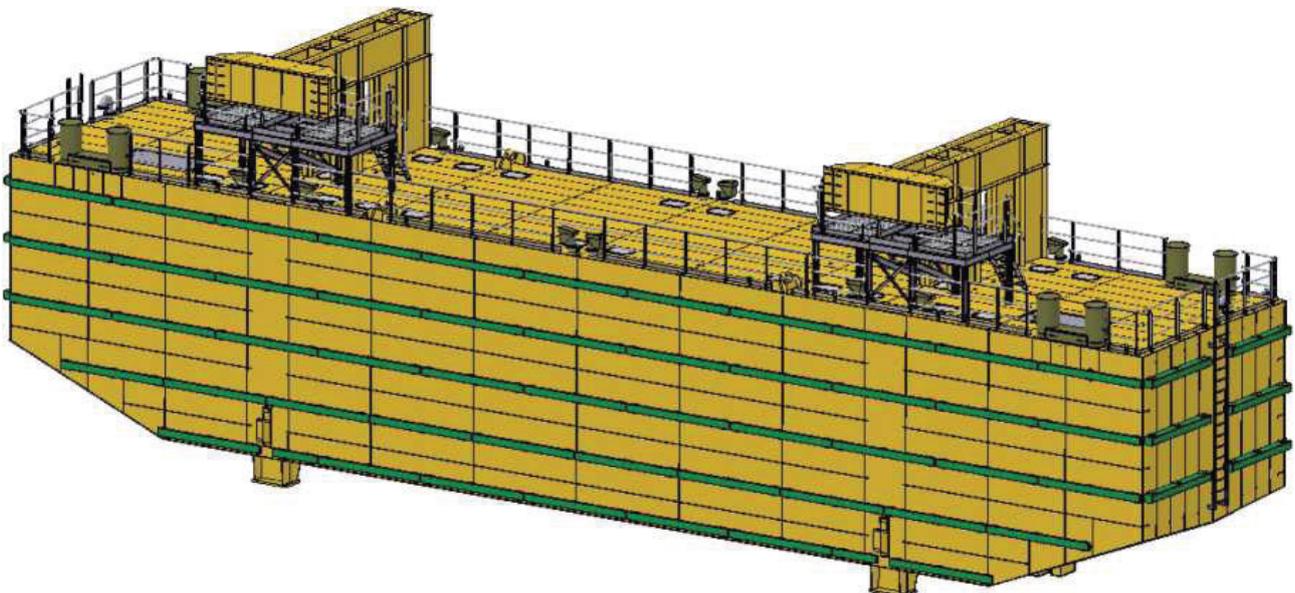


Abbildung 4-6 Darstellung eines Hebepontons

## 5. Schleusenammer in Brunsbüttel

### 4.3.2. Auftriebssicherheit vs. Lasteinleitung

Auftriebssicherheit ist in Deutschland normativ geregelt, da schwimmende Tore bei Sturmflut ein enormes Risiko für die hinter der Hochwasserschutzlinie befindlichen Städte darstellen. Diese Auftriebssicherheit hängt nicht von der Größe des Bauwerks, den Planungsverfahren oder den Herstellungsprozessen ab. In diesem Fall wäre eine systematische statistische Analyse angebracht, um Sicherheitsfaktoren unter Berücksichtigung aller Parameter und ihrer statistischen Verteilung zu ermitteln. In diesem Zusammenhang würde die gewählte Tiefe der technischen Bearbeitung, der Konstruktion sowie der Herstellungsprozesse berücksichtigt werden.

Die Massen und Auftriebsvolumina können mit einem 3D-BIM-Modell auf Grundlage des Baubestands deutlich genauer festgelegt werden als auf Grundlage einer einfachen zweidimensionalen Entwurfszeichnung. Da Sicherheitsfaktoren auch immer berücksichtigen, wie die eigentlichen Bauteile im numerischen Modell dargestellt werden, könnten die benötigten Sicherheitsfaktoren beispielsweise durch gesteigerte Genauigkeit der Methoden verringert werden.

Die Sicherheitsfaktoren gehen aus dem wirkenden Auftrieb (z. B. Ballastzellen, Maschinenräume, Festkörperauftrieb) und den Gegenantriebskräften hervor [z. B. Eigengewicht der eingebauten Tore (in Abhängigkeit von der Methode zur Gewichtsbestimmung), Ballast (permanent und variabel), variable Lasten wie Schlick].

Hinsichtlich des variablen Ballasts (Füllen von Ballasttanks) muss die Zuverlässigkeit der Verfahren in die Berechnung berücksichtigt werden (automatisches Füllen, Monitoring des automatischen Füllens, Mitarbeiter (und ihre Qualifikation) zur Überwachung vs. ausschließlich aus der Ferne gesteuert). Damit sollte die Wahrscheinlichkeit für die Lagesicherheit des Tors gemäß den Anforderungen der Gesellschaft nachgewiesen werden. Dieser Nachweis sollte berücksichtigen, dass ein Stabilitätsverlust zu beträchtlichem Schaden für die Städte führen könnte, die hinter der Deichschutzlinie liegen.

Die wichtigsten Anteile der Auftriebskraft sind der Auftrieb aller Ballastzellen und der Maschinenräume. Die Größe und Anordnung der Ballastzellen müssen so gewählt werden, dass das gesamte

Tor sicher schwimmt. Der Auftrieb durch die Ballastzellen muss jedoch auch mit zusätzlichem Ballastwasser kompensiert werden, einschließlich eines Puffers zusätzlich zum Eigengewicht des Tors sowie zu allen dauerhaft installierten Geräten, um der Auftriebssicherheit des Tors im Betrieb gerecht zu werden.

Die grundsätzliche Festlegung der Auftriebssicherheit in Deutschland führt zu vergleichsweise hohen Traglasten für schwere Bauwerke. Auch während des Betriebs muss die Auftriebssicherheit gewährleistet sein. Für eine spezifizierete Sicherheit über 1,10 (=  $R_d / E_d$ ) müssen beispielsweise mindestens 10 % der Gesamtmasse des Tors über das Stützbauwerk abgetragen werden (Toroberwagen / Torunterwagen und deren Lastweiterleitung, z. B. in das Rad-Schiene-System). Damit ergibt sich die maßgebende Belastung der vertikalen Richtung aus den Anforderungen an die Auftriebssicherheit.

### 4.3.3. Schwimmstabilität

Die Kriterien für Schwimmstabilität müssen für das schwimmende Tor eingehalten werden, sodass dieses trotz Wellen und Wind den Anforderungen an den Arbeitsschutz gerecht wird. Die Stabilitätskriterien umfassen die numerische Ungenauigkeit der Differenz hoher Zahlen (Auftrieb und Abtrieb sind bei einem schwimmenden Tor gleich; Kräftegleichgewicht). Die Herstellung muss daher sehr sorgfältig geschehen; am besten mit der gewogenen Masse der eingebauten Tore oder einer Gewichts-berechnung während in der Werkstattplanung, die einer Verwiegung gleichkommt. Andernfalls können die Zielwerte nicht erreicht werden (z. B. Schwimmstabilität, Schwimmtiefe, usw.).

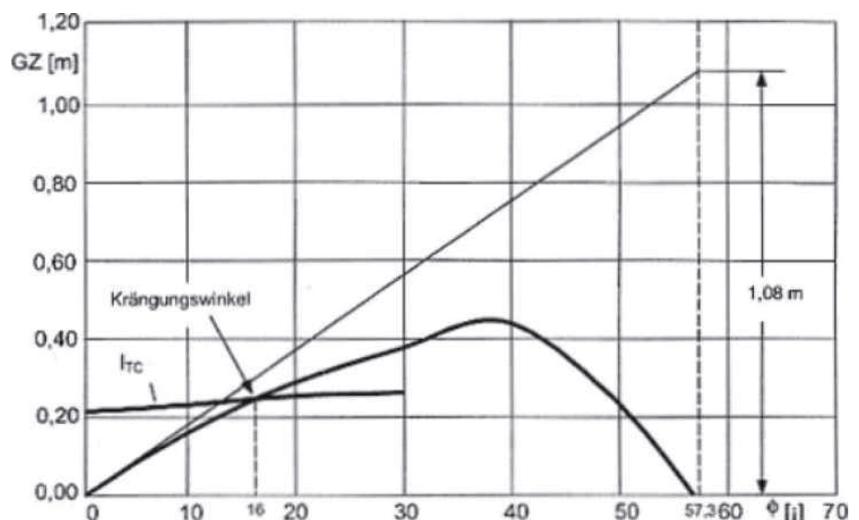


Abbildung 4-7 Beispiel einer Hebelarmkurve mit Darstellung der metazentrischen Höhe (1,08 m bei 57,3°)

## 5. Schleusenammer in Brunsbüttel

Generell wird die Schwimmstabilität durch metazentrische Höhen festgelegt. Zudem werden Eigenschaften der Schwimmstabilität durch Anforderungen der Hebelarmkurve beschrieben. Dabei kann der Zusammenhang für Rechteckquerschnitte dadurch beschrieben werden, dass die metazentrische Höhe bei  $57,3^\circ$  ( $= 1,0$  rad) aufgetragen die Ursprungstangente an die Auftriebshebelarme wieder spiegelt.

$$h_M = \frac{I_0}{V_W} - h_k \quad (3)$$

In dieser Gleichung ist  $I_0$  das Trägheitsmoment der eingetauchten Fläche um die Achse, um die Schwimmstabilität untersucht werden soll. Daraus ergibt sich:

$$V_W = \frac{G_{Tor}}{\gamma_W} = V_{Schwimmtank} + V_{Rest} = A_{Tank} \cdot t_{Tank} + V_{Rest} \quad (4)$$

$G_{Tor}$	Gesamteigengewicht des Tors mit allen Geräten; Alle anderen Gewichte durch Verunreinigung, Vegetation werden in den entsprechenden Kombinationen analysiert
$\gamma_W$	Rohdichte des Wassers
$V_{Schwimmtank}$	Das Volumen des Schwimm tanks unter Wasser
$V_{Rest}$	Das Restvolumen aller anderen Körper unter Wasser. Bei einem Schiebetor ist dies vor allem das Volumen aller Stahlquerschnitte unter dem Schwimm tank
$A_{Tank}$	Die Oberflächen aller Ballastzellen
$t_{Tank}$	Die Eintauchtiefe des Tanks

Die Eintauchtiefe spielt eine wichtige Rolle, da sie einen bedeutenden Parameter der Schwerpunkt lage des Auftriebs festlegt. Dies wird zur Bestimmung von  $h_k$  benötigt.  $h_k$  ist die Hubhöhendifferenz zwischen dem Schwerpunkt des Eigengewichts und dem Auftrieb, was wie folgt berechnet werden kann:

$$h_k = a_G - a_v$$

$$h_k = \frac{\sum G_i \cdot e_i}{\sum G_i} - \frac{\sum A_i \cdot e_{A,i}}{\sum A_i} = \frac{\sum G_i \cdot e_i}{\sum G_i} - \frac{\gamma_W \cdot \sum A_i \cdot e_{A,i}}{\sum G_i} \quad (5)$$

$$h_k = \frac{1}{G_{Tor}} \cdot \left( \sum G_i \cdot e_i - \gamma_W \cdot \sum A_i \cdot e_{A,i} \right)$$

Alle Hubdaten beziehen sich auf den Kielpunkt, d. h. in diesem Fall das Zentrum des schwimmenden Tanks. Die einzelnen Schwerpunkte werden mit ihren Hebelarmen  $\sum G_i \cdot e_i$  und  $\sum A_i \cdot e_i$  multipliziert. Diese Zahlen, die voneinander abgezogen werden, sind deutlich höher als ihre Differenz. Wenn also eine der Zahlen auch nur geringfügig schwankt, was aufgrund der Toleranz immer der Fall ist, sind die Auswirkungen auf das Ergebnis groß. Deshalb bedarf es besonderer Sorgfalt bei der Bestellung des Materials im Fall von Änderungen, während des Aufbaus, usw., sodass die Schwimmstabilität einen akzeptablen Wert erreicht.

Im Gegensatz zu großen Schiffen ist die Beschreibung der äußeren Form des Schiebetorkörpers, der Wasser verdrängt, deutlich schwieriger. Dies liegt an der zerklüfteten Form, die häufig entlang der Längsachsen nicht symmetrisch verläuft. Die Asymmetrie der 5SKB ergibt sich aus den Anforderungen des Schwimmprozesses. Die Stauwand ist auf einer Seite gekrümmt, um genügend Raum zum Einschwimmen in die Torkammern zu haben.

Die Belastung durch variable Lasten auf den Toren resultiert nicht aus den Lademeistern (Schiffen), sondern teilweise zufällig aus natürlichen Prozessen wie Schlickablagerungen usw. oder aus dem Betrieb des Systems. Es sind nicht zu allen Zeiten Mitarbeiter vor Ort; vielmehr wird die Schleuse von einer Kontrollstation aus gesteuert. Eine Auswirkung ungleicher Neigungen (Trimm/Krängung) kann beispielsweise durch installierte Messsysteme auf der 5SKB festgestellt werden.

Die Sensitivität wird auf Grundlage der Zwischenergebnisse der berechneten Schwimmstabilität für die Schiebetore der 5SKB dargestellt. Der Graph kann hier als extremes Beispiel herangezogen werden. Wenn der Schwerpunkt des Auftriebs  $a_v$  um 10 % nach unten verlagert wird, wird die metazentrische Höhe und somit die Schwimmstabilität um 50 % verringert. Die Sensitivität der Schwimmstabilität zeigt, dass die Werkstattplanung und die Herstellung extrem sorgfältig vorgenommen werden müssen, da beispielsweise zusätzliche oder verringerte Masse dazu führen, dass das Tor höher oder niedriger schwimmt. Aus diesem Grund muss die Herstellung sehr sorgfältig geschehen. Mit ausreichender Gegenmaßnahme im Werkstattplanen muss eine Gewichts berechnung wie verwogen durchgeführt werden.

## 5. Schleusenkammer in Brunsbüttel

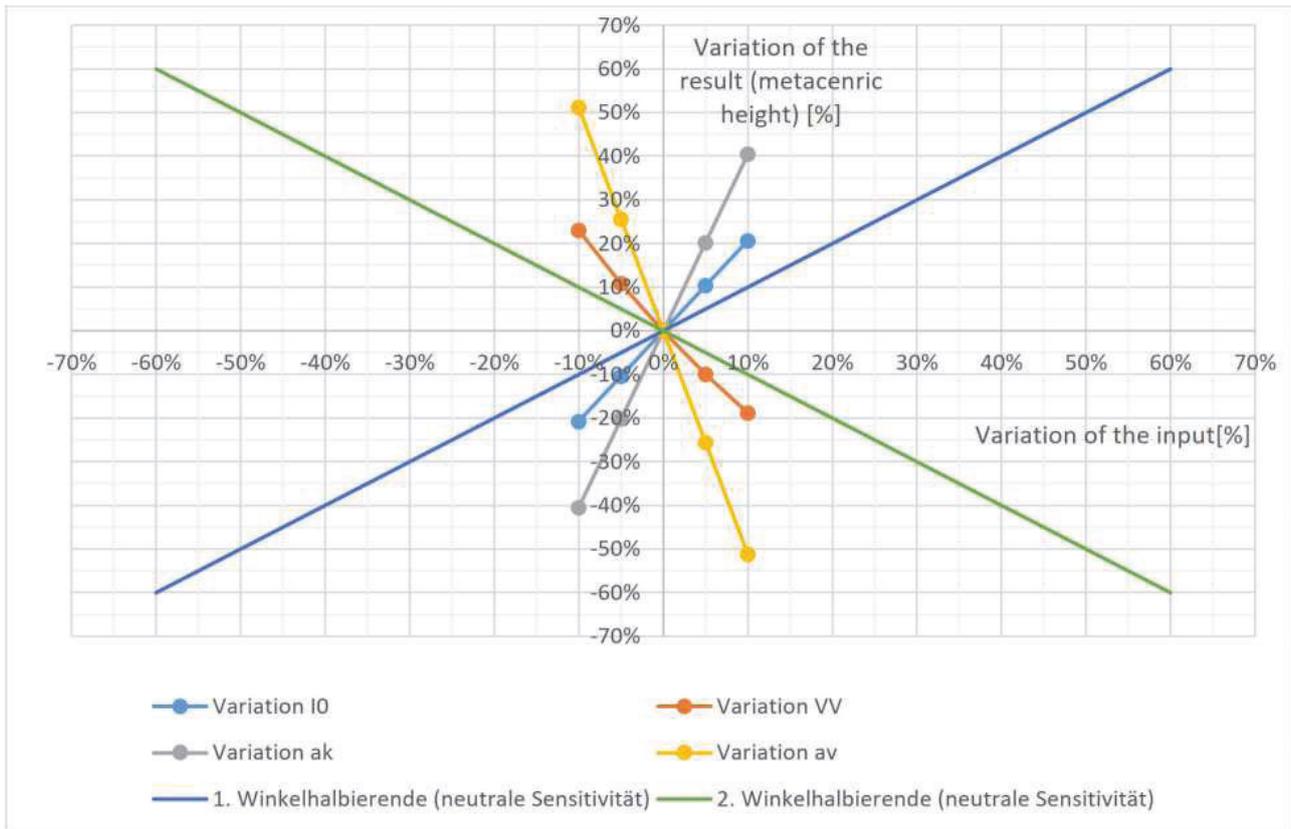


Abbildung 4-8 Sensitivitätsanalyse der Eingangswerte und ihre Auswirkungen auf die metazentrische Höhe

Alle erwähnten Parameter unterliegen der Toleranz. Dies betrifft den Entwurf und die Herstellung des Stahlbaus (z. B. Walztoleranz, Abweichung bei einzelnen Maßen, Hilfsgeräte für den Aufbau) sowie die Schichtdicke des Korrosionsschutzes. Davon abgesehen sind alle variablen Auswirkungen wie Schlick, Verunreinigung und Vegetation schwer zu beurteilen und niemals genau zu erfassen. Die Lage des Schwerpunktes des Auftriebs unterliegt trotz eines sorgfältigen Entwurfs Ungenauigkeiten, z. B. durch versehentlich eingeschlossene Luft.

Auf Grundlage der metazentrischen Höhe können die aufrichtenden Momente einfach für leichte Veränderungen der Schwimmposition berechnet werden:

$$M_A = G_{Tor} \cdot h_M \cdot \delta\varphi \quad (6)$$

Diese Gleichung gilt für die Umgebung des Ursprungs des austarierten Schwimmkörpers. Dem Widerstandsmoment des Schwimmkörpers (Pantokarene) stehen die Auswirkungen von Wind, Wellen, Schräglage beim Schleppen usw. gegenüber. Diese Auswirkungen sollen für Schleusentore für die genauen Entwurfsbedingungen berücksichtigt werden, z. B. der Transport zum Anlegeplatz und die Distanz bis zum Einsatzort. Im Vergleich zu

Schiffen auf offener See sind diese Seegangparameter deutlich niedriger.

### 4.4. Füllschütze

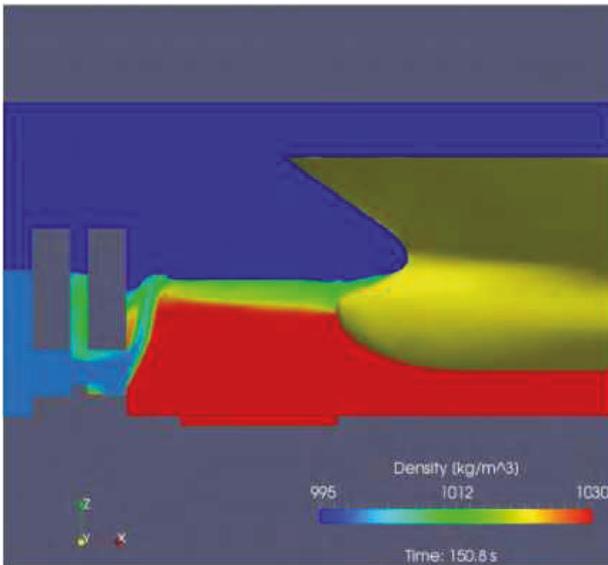
Die Füllschütze werden von Hydraulikzylindern betrieben. Für jeden Schützkanal werden zwei Reihen von Schützen angeboten. Die Schütze haben eine doppelte Dichtung, sodass der Schützkanal auch durch je eine Reihe von Schützen abgedichtet werden kann. Zudem sind die Schütze selbstschließend, um ausreichende Zuverlässigkeit für den Verschluss des Nord-Ostsee-Kanals zu gewährleisten. Aus diesem Grund wurden die Füllschütze mit Ballast versehen, sodass sie auch im Falle eines Stromausfalls schließen können. So kann ausreichend Prozesssicherheit gewährleistet werden, um das Hinterland vor Sturmfluten im Fall eines Stromausfalls oder Schadens am Hydraulikzylinder zu schützen.

Hinsichtlich der Schwimmstabilität ist das Anheben der Schütze einer der Schlüsselp Parameter, da dies aufgrund des vergleichsweise hohen Eigengewichts der Schütze eine maßgebende Auswirkung auf die Schwimmstabilität hat. Diese und andere Parameter werden bei der Festlegung der Verlässlichkeit des Torsystems berücksichtigt.

## 5. Schleusenammer in Brunsbüttel

### 4.4.1. Anforderungen an den Füllschützentwurf

Die Strömungsgeschwindigkeit ist wichtig für kleinere Schiffe (deren Schwimmposition nicht übermäßig beeinträchtigt werden sollte), für Kräfte im Zusammenhang mit dem Festmachen der Schiffe und den Kolksschutz sowie für die Bewertung von Statik, Dynamik und Ermüdung der Schütze. Ein Schlüsselfaktor für sicheres Füllen ist deshalb der bauliche und strömungstechnische Entwurf der Füllkanäle. Winkelprofile (sogenannte Störwinkel) werden in den Füllkanälen genutzt, um Energie umzuwandeln und den Zustrom in die Schleusenammer aufzubrechen. So wird der Wasserzufluss aufgespalten, homogenisiert und somit die Maximalgeschwindigkeit des Zuflusses verringert.



Abgesehen von der Wasserstandsdifferenz als solcher hängt die Flussrichtung von unterschiedlichen spezifischen Wassergewichten in der Schleusenammer und auf der Gegenseite ab (Innenhaupt: Nord-Ostsee-Kanal; Außenhaupt: Elbe). Infolgedessen wurde untersucht, ob Frischwasser in Brackwasser fließt oder umgekehrt (siehe Abbildung 4-9). Die Bilder der folgenden Darstellung zeigen die Computerergebnisse mit der Annahme unrealistischer spezifischer Wassergewichte; reines Frischwasser gibt es bei der Schleuse nicht, zumindest nicht mehr als der hier angegebene Salzgehalt. Die Auswirkung wird jedoch auf Grundlage der Entwurfsanforderungen deutlich. Der tatsächliche Salzgehalt hat spürbare Auswirkungen auf die Kräfte beim Festmachen der Schiffe (Thorenz, September 18-21, 2017). In der Praxis hat sich gezeigt, dass bei ausreichender Redundanz keine Probleme zu erwarten sind.

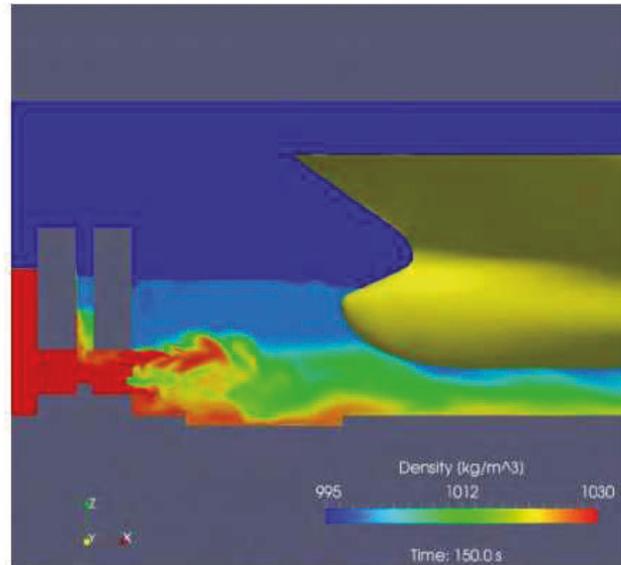


Abbildung 4-9 CFD-Simulation, Auswirkungen unterschiedlicher spezifischer Wassergewichte

Aufgrund der Empfindlichkeit der Teflonbeschichtung gegen Abnutzung an den Dichtungen wurden die Hebekräfte der Schütze nicht optimiert. Die verwendeten Dichtungen waren konventionelle Notprofilabdichtungen. Hinsichtlich der Dichtung müssen die Verformung der Tore, das Tragegerüst und die Dichtungen untersucht werden. An den Stellen, wo die Strömung einen großen Einfluss auf die Spalttopologie und somit auf das Strömungsverhalten hat, werden gekoppelte mechanisch-hydraulische Berechnungen (CFD - Computational Fluid Dynamics) benötigt.

Aufgrund des enormen Berechnungsaufwands sind diese Berechnungen für das gesamte System (gesamtes Tor) weder angebracht noch notwendig; stattdessen werden Subsysteme herangezogen. Für diese Subsysteme müssen angemessene Schnittstellen identifiziert werden. An diesen

Schnittstellen müssen generelle Bedingungen korrekt überführt werden. Alle Toleranzen und Distanzen müssen so definiert werden, dass die vom Bauherrn gewünschte Dichtigkeit gesichert ist, Störungen an den Dichtungen oder übermäßige Abnutzung jedoch verhindert werden. Schwingungen und Schäden aufgrund von Abnutzung sind wahrscheinlich. Der bauliche und strömungstechnische Entwurf der Füllschütze ist für die Gesamtfunktion der Schleuse von großer Bedeutung.

### 4.4.2. Füllschütze - Bewirtschaftungsplanung der Anlage

Die Wartung und Reparatur der Füllschütze ist ein wichtiger Teil des Entwurfs. Auf der zugänglichen Oberseite der Tore stehen Flächen zur Kraftableitung für Mobilkräne zur Verfügung. Aus diesem

## 5. Schleusenkammer in Brunsbüttel

Grund wurde der Unterhalt der Anlage bereits in den eigentlichen Entwurf aufgenommen. Als graphisches Beispiel wird die Einbaureihenfolge der Füllschütze gezeigt, die zum Zwecke der Wartung

vom Tor entfernt werden können. Abbildung 4-10 gibt einen Überblick über die Füllschütze und deren Anbringung.

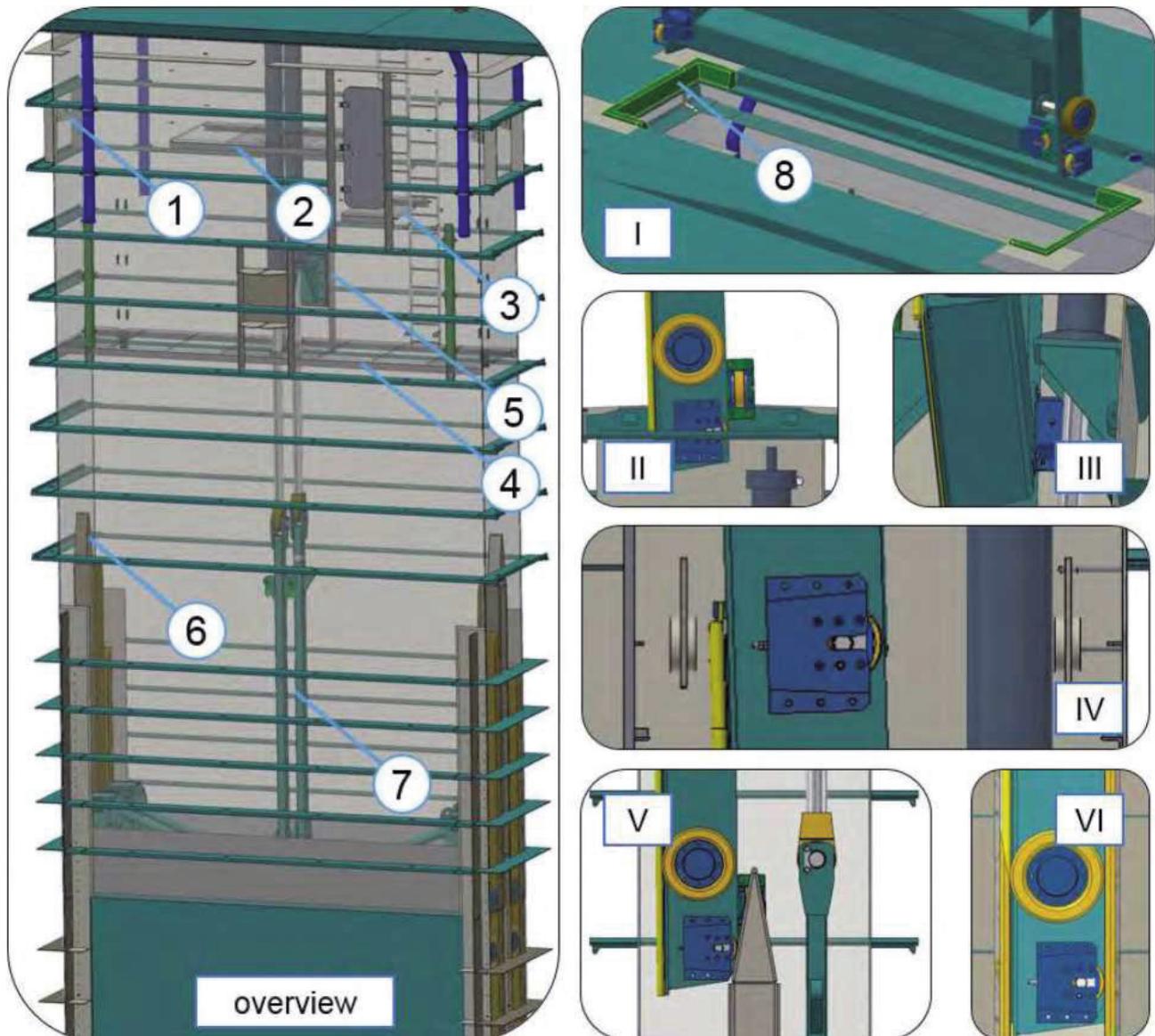


Abbildung 4-10 Darstellung der Füllschütze und wichtiger Punkte während des Einbaus

Abbildung 4-10: Überblick) zeigt die Endfassung, Position wird definiert als Distanz zwischen Überbau und unterer Ecke des Füllschütz (FS), I) FS über Überbau, II) FS 0,5 m unter Überbau - visuelle Überprüfung während Positionierung - Achtung: hydraulisches Leitungssystem, III) FS 4,90 m unter dem Überbau - Flaschenhalszylinder zu beobachten, langsam bewegen, IV) FS 5,66 m unter Überbau - Flaschenhals an Dichtung, Koppel (vis-

uelle Überprüfung), V) Position 9,36 m unter Überbau, Guide-Installation VI) Position 11,84 m unter Überbau - visuelle Überprüfung, federbelastetes Laufrad greift, 1) Hebeöse, 2) hydraulischer Plattformzylinder, 3) Plattformeingang, 4) Plattformzylinderkonsole, 5) Zylinderkonsole, 6) Guide-Installation, 7) Kupplungsstange, 8) temporäre Leitinstallation (UHMW-PE)]

## 5. Schleusenkammer in Brunsbüttel

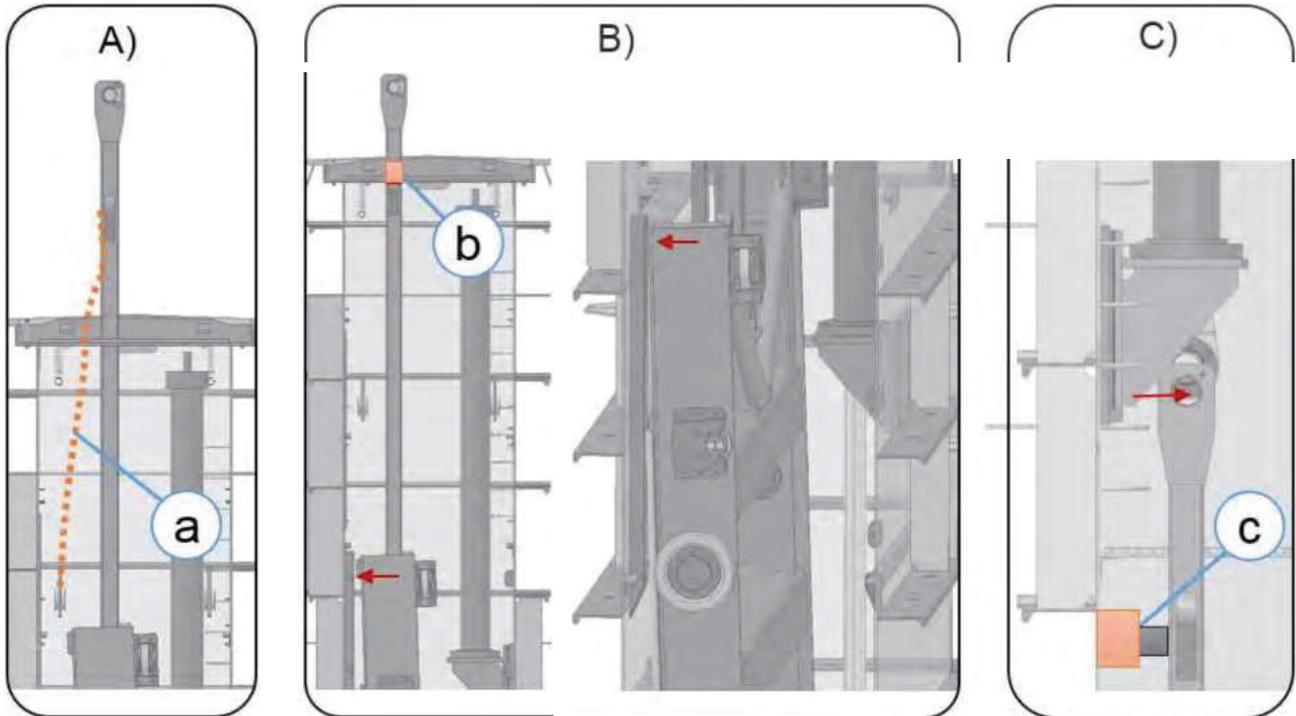


Abbildung 4-11 Darstellung der Füllschütze und Hilfsbauwerk für die Installation

Abbildung 4-11. k) FS 7,25 m unter Überbau - Befestigung des Sicherungsseils, B) FS 8,40 m unter Überbau - Positionsmarkierung beachten - FS mit Kran entfernen, um mit UHMW-PE für den Zusammenbau zusammenzuführen C) FS 14,00 m unter Überbau - von Sicherungsseilen (a) in genauer Position gehalten - Kupplungsstange durch hydraulischen Zylinder entfernen (Verbindungszyylinder mit Kupplungsstange), a) Sicherungsseil, b) Positionsmarkierung, c) hydraulischer Zylinder

### 4.5. Spülsystem

In Kombination mit dem Ballast- und Lenzsystem wurde für die 5SKB ein Spülsystem eingebaut. Die Spüleinheiten befinden sich in der Tankdecke und in der Nähe der Torunterwagenschienen. Die Aufgabe des Spülsystems ist es, den Bereich des Torunterwagenschienensystems und vor allem die Tankdecke von sedimentiertem Schlamm zu befreien. Zudem flutet bzw. leert ein Pumpensystem die Ballasttanks. Dazu sind große Rohre für dieses Pumpensystem auf dem und im Tor notwendig. Die Steuereinheiten für diese Teile werden teilweise auf dem Tor angebracht. Zudem ist ein Maschinenraum im Tor notwendig, um alle diese Einheiten unterzubringen.

## 5. Schleusenammer in Brunsbüttel

### 5. Kurzfassung

Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen ist der Entwurf von Schiebetorbauwerken für Seeschleusen sehr schwierig (eine der schwierigsten Entwurfsaufgaben). Unterschiedliche Fachgebiete müssen dazu herangezogen werden, also Stahlbau, Schiffsbau, Rohrleitungsbau, Maschinenbau, Steuerungstechnik, Automatisierung. Der Entwurf wird am besten in einem dreidimensionalen BIM unter Einbeziehung aller Fachgebiete erstellt. Die numerische Darstellung muss ausreichend transparent sein, so dass die unterschiedlichen Bedingungen eines solchen Tors bildlich dargestellt werden können.

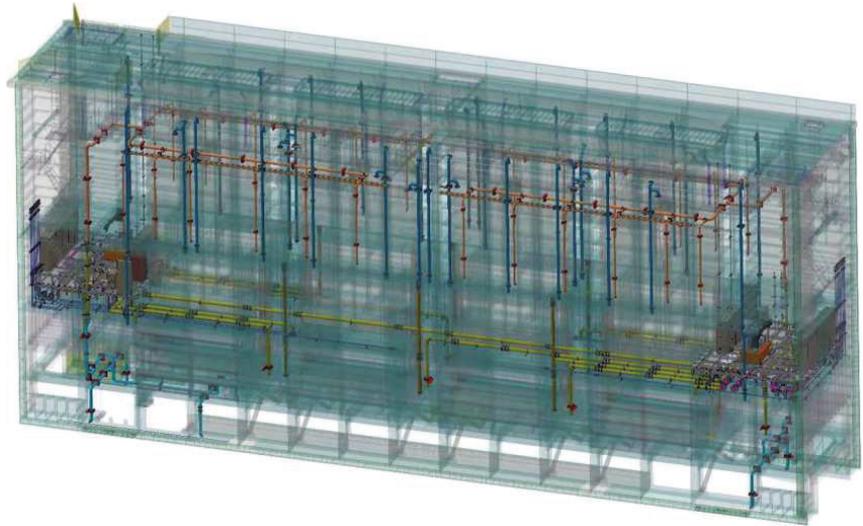


Abbildung 4-12 Torspülssystem (orange Rohre - Tankdecke / blaue Rohre am unteren Ende des Tors - Schienensystem)

Für den erfolgreichen Entwurf und die Herstellung eines so komplizierten Bauwerks müssen alle beteiligten Parteien zusammenarbeiten.

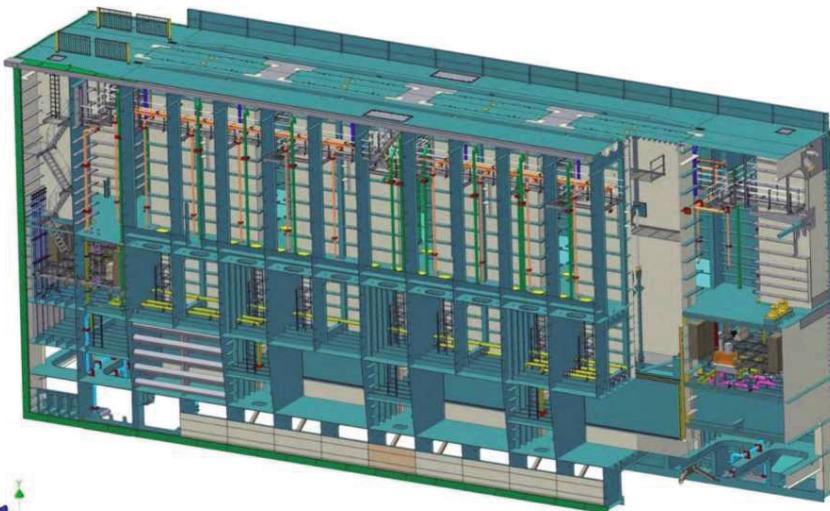


Abbildung 5-1 Isometrisches CAD-Modell der 5SKB

### 6. Literaturverzeichnis

Brunsbüttel, W. u. (August 2016). Bau der 5. Schleuse in Brunsbüttel.

DIN-EN-1993-1-9: (2005). Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9 Ermüdung. Brüssel: CEN.

Petersen, C. (2013). Stahlbau - Grundlagen der Berechnung und bauliche Ausbildung von Stahlbauten. München: Springer Vieweg.

Schneider, J., & Schlater, H. (2007). Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen - Grundwissen für Ingenieure. Zürich.

Thorenz, C. (September 18-21, 2017). Numerical investigations of salinity effects in locks. 8th international PIANC-smart rivers conference . Pittsburgh.