Planfeststellungsverfahren

für den
Ersatz der beiden Kleinen Schleusenkammern und Anpassung der Vorhäfen in Kiel-Holtenau

VORHABENTRÄGER:

WASSERSTRASSEN- UND SCHIFFFAHRTSAMT KIEL-HOLTENAU

SCHLEUSENINSEL 2

24159 KIEL-HOLTENAU

7.3

Zustandsgutachten der BAW zur Alten Schleuse

Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Zustandsgutachten zur Alten Schleuse Kiel-Holtenau

A395 101 10257

Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Zustandsgutachten zur
Alten Schleuse Kiel-Holtenau

Auftraggeber:	WSA Kiel-Holtenau Schleuseninsel 2 24159 Kiel	
Auftrag vom:	11.05.2012, Az.: 213.2 - ModS 7	
Auftrags-Nr.:	BAW-Nr. A395 101 10257	
Aufgestellt von:	Abteilung:	Bautechnik
	Referat:	Massivbau
	Bearbeiter:	Dr. Bödefeld Kiesel

Karlsruhe, 16. April 2014

Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

Zusammenfassung

Mit Schreiben Gz: 231.2 – ModS 7 vom 11.05.2012 hat das WSA Kiel-Holtenau die BAW mit der Begutachtung der Alten Schleuse in Kiel-Holtenau beauftragt. Voran gegangen war eine Vorbesprechungen am 13.02.2012 in Karlsruhe, die im Vermerk Gz: 231.2 – ModS 7 vom 13.02.2012 dokumentiert ist.

Die an der Alten Schleuse Kiel-Holtenau durchgeführten Untersuchungen ergeben ein in sich schlüssiges Bild vom Zustand des Bauwerks.

Das Bauwerk ist an heutigen Normen gemessen von Beginn an nicht tragfähig gewesen. Die Defizite sind für die Basis-Einwirkungen nicht so groß, dass das Bauwerk versagt hätte, was mit genaueren, nichtlinearen Berechnungen belegt werden konnte. Aber es muss davon ausgegangen werden, dass die geforderten Sicherheiten zu keiner Zeit eingehalten waren.

Grund für die dennoch 120jährige Standzeit ist unter anderem die sehr sorgfältige Ausführung und die Auswahl sehr guter Baustoffe. Die Materialuntersuchungen belegen auch heute noch sehr hohe Materialkennwerte außerhalb der geschädigten Bereiche.

Zusätzlich aufgetretene Einwirkungen während der Nutzung durch hohe Verkehrslasten, Eis und Schiffsverkehr haben aber zu Überbeanspruchungen geführt, die sich in unterschiedlichen Schädigungen zeigen.

Primär fallen große, kammerparallele Risse und Klüfte auf, die wahrscheinlich temperaturinduziert entstanden sind und infolge Durchströmung und Frostbeanspruchung insbesondere in der als Trockendock genutzten Südkammer zu den heute erkennbaren Schädigungen geführt haben.

Darüber hinaus hat die Überbeanspruchung des Querschnitts zu einem Riss im erdseitigen First des Längslaufs geführt, der in der Südkammer vorgefunden wurde. Des Weiteren führt die Überschreitung der Schubtragfähigkeit zu einem Versatz in der kammerseitigen Längslaufwand, der sowohl in der Kammer als auch im Längslauf sichtbar ist. In [S2] wird von gleichartigen Schäden in der Seitenmauer der Nordkammer berichtet.

Die archivierten Unterlagen belegen, dass die auf die Überbeanspruchung hinweisenden Schäden bereits vor ca. 40 Jahren vorhanden waren und auch als solche erkannt wurden.

Tragfähigkeitsreserven lassen sich auch mit verfeinerten Methoden nicht mobilisieren, wie nichtlineare Vergleichsberechnungen belegen. Diese Erkenntnis belegen auch die Schäden am Bauwerk, die zeigen, dass lokales Versagen bereits stattgefunden hat.

Die Gesamtbewertung der Erkenntnisse führt zu dem Ergebnis, dass beide Schleusenkammern erhebliche Sicherheitsdefizite aufweisen, die einem Weiterbetrieb der Schleuse widersprechen. Wir empfehlen, die Alte Schleusenanlage Kiel-Holtenau außer Betrieb zu nehmen und Sicherungsmaßnahmen vorzusehen, die eine Gefährdung für Menschen auf dem Gelände der Schleusenanlage ausschließen.

Aufgrund der gegebenen Baugleichheit der Neuen Schleusen Kiel-Holtenau und der Alten Schleusen Brunsbüttel empfehlen wir dringend, auch diese beiden Bauwerke einer ähnlichen Begutachtung zu unterziehen.

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Verwendete Unterlagen	2
3	Bauwerk	4
3.1	Allgemeine Beschreibung	4
3.2	Konstruktion	6
4	Zustand des Bauwerks	8
4.1	Südkammer	8
4.1.1	Untersuchungsumfang	8
4.1.2	Ergebnis	8
4.2	Nordkammer	10
4.2.1	Untersuchungsumfang	10
4.2.2	Ergebnis	10
5	Materialuntersuchungen	12
5.1	Ergebnisse früherer Untersuchungen	12
5.2	Ergebnisse aktueller Untersuchungen	12
6	Statische Untersuchungen	15
6.1	Ergebnisse früherer Untersuchungen	15
6.2	Ergebnisse aktueller Untersuchungen	17
6.3	Ergebnisse der nichtlinearen Analyse	22
7	Zusammenfassung	25
8	Literatur	27

Bildverzeichnis Seite

Bild 1: Draufsicht der Schiffsschleusenanlage Kiel-Holtenau (GeoViewer.WSV) 4
Bild 2: Dockung der großen Schiebetore in der gelenzten Südschleuse, 1970er Jahre (BAW-Bildarchiv) 5
Bild 3: Dockung der großen Schiebetore in der gelenzten Südschleuse, 1970er Jahre (BAW-Bildarchiv) 6
Bild 4: Querschnitt der Schiffsschleusenanlage 7
Bild 5: FE-Modell der Seitenmauer 17
Bild 6: FE-Modell der Mittelmauer 18
Bild 7: Untersuchte Schnitte im Querschnitt der Seitenmauer 19
Bild 8: Ebene Hauptspannungen im Betriebslastfall 20
Bild 9: Auswertung der Ausmitte im Betriebslastfall 20
Bild 10: Auslastungsgrad der Schubtragfähigkeit im Betriebslastfall mit Schädigung 22

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Detaillierte Zustandsbeschreibung der Südkammer
Anlage 2: Detaillierte Zustandsbeschreibung der Nordkammer
Anlage 3: Übersicht der Ergebnisse der Videoskopie
Anlage 4: Teilgutachten Bauwerks- und Materialuntersuchungen
Anlage 5: Statische Untersuchungen
Anlage 6: Nichtlineare Analysen

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Mit Schreiben Gz: 231.2 – ModS 7 vom 11.05.2012 hat das WSA Kiel-Holtenau die BAW mit der Begutachtung der Alten Schleuse in Kiel-Holtenau beauftragt. Voran gegangen war eine Vorbesprechungen am 13.02.2012 in Karlsruhe, die im Vermerk Gz: 231.2 – ModS 7 vom 13.02.2012 dokumentiert ist.

Ziel der Begutachtung ist es, Erkenntnisse für eine Grundinstandsetzung zu gewinnen, wobei eine langfristige Nutzung von 50 Jahren und mehr angestrebt wird. Zusätzlich werden die Möglichkeiten einer Leistungssteigerung durch offenen Betrieb und Umstellung auf ein Stemmtor pro Haupt, das dann auch gegen den Wasserdruck schließen können muss, außerhalb dieses Gutachtens untersucht.

Das Gutachten soll neben der Zustandsbeschreibung der Schiffsschleusenanlage auch Materialuntersuchungen und Berechnungen zur Tragfähigkeit umfassen. Im Laufe der Bearbeitung hat sich gezeigt, dass auch eine Aufarbeitung der Historie und der bisher durchgeführten Untersuchungen erheblichen Erkenntnisgewinn brachte.

Im Rahmen der Bearbeitung ist der sehr schlechte Zustand des Bauwerks zunehmend deutlich geworden. Die Aufgabenstellung und der Aufgabenumfang haben sich dadurch signifikant verändert.

2 Verwendete Unterlagen

Schriftwerk (chronologisch)

S1 Paul (1973a): Standsicherheitsnachweis Alte Schleusen Kiel-Holtenau. 31.10.1973. WBA Kiel-Holtenau.

S2 Paul (1973b): Bericht über die Begehung der Alten Nordschleuse Kiel-Holtenau. 03.11.1973. WBA Kiel-Holtenau.

S3 Paul (1974a): Bericht über die Sanierung der Mittelmauer-Südseite, Alte Schleusen Kiel-Holtenau. November 1973 – März 1974. WBA Kiel-Holtenau.

S4 WBA Kiel-Holtenau (1974a): Begehung der Alten Südschleuse Kiel-Holtenau. 27.04.1974. Kiel-Holtenau

S5 WBA Kiel-Holtenau (1974b): Zustand der Alten Schleusen Kiel-Holtenau. 24.06.1974. Kiel-Holtenau.

S6 WBA Kiel-Holtenau (1974c): Instandsetzung der Alten Schleusen Kiel-Holtenau, Zustand der Kammerwände und der Sperrtornischen in der Nordkammer. 22.07.1974. Kiel-Holtenau.

S7 Paul (1975): Berechnung der Standsicherheit der Alten Schleusen Kiel-Holtenau.16.02.1975. WBA Kiel-Holtenau.

S8 WBA Kiel-Holtenau (1977):Teilentwurf: Bauliche Grundinstandsetzung der Alten Schleusen Kiel-Holtenau. 01.12.1977. Kiel-Holtenau.

S9 Mohn, H. (1989a): Statische Berechnung Alte Schiffsschleusenanlage Kiel-Holtenau, Standsicherheitsuntersuchung zur Nutzung als Trockendock. 14.04.1989. Kiel.

S10 WSD Kiel (1989): Alte Schleusen des NOK, Untersuchung der Standsicherheit. 29.05.1989. Kiel.

S11 Mohn, H. (1989b): Statische Berechnung Alte Schiffsschleusenanlage Kiel-Holtenau, 1. Ergänzung zur Standsicherheitsuntersuchung zur Nutzung als Trockendock. 22.09.1989. Kiel.

S12 Mohn, H. (1989c): Statische Berechnung Alte Schiffsschleusenanlage Kiel-Holtenau, 2. Ergänzung zur Standsicherheitsuntersuchung zur Nutzung als Trockendock. 22.12.1989. Kiel.

S13 Mohn, R. (1996a): Alte Schleuse Kiel-Holtenau, Standsicherheitsuntersuchungen. 04.06.1996. Kiel.

S14 Schmiedel, U. (1996): Standsicherheitsnachweise Alte Schleusen Kiel-Holtenau. 26.09.1996. Pinneberg.

S15 Mohn, R. (1996b): Anmerkungen des Ingenieurbüros zum Prüfbericht. 21.10.1996. Kiel.

S16 Bödefeld, J. (2006): Bauwerksinspektion an der Schiffsschleusenanlage Kiel-Holtenau, Standsicherheit der Kleinen Schleusen bei Revision. 11.04.2006. BAW Karlsruhe.

S17 WSA Kiel-Holtenau (2013): Bauwerksinspektionsmessung; hier Messdatenauswertung des Monitorings während der Lenzung der Südkammer der Kleinen Schleusen Kiel-Holtenau. 14.06.2013. Kiel-Holtenau.

Planwerk

P 1 WSA Kiel-Holtenau (2012a): Alte Schleuse Kiel-Holtenau Horizontalschnitt E-F. Kiel-Holtenau.

P 2 WSA Kiel-Holtenau (2012b): Alte Schleuse Kiel-Holtenau Längsschnitt T-U. Kiel-Holtenau.

P 3 WSA Kiel-Holtenau (2012c): Alte Schleuse Kiel-Holtenau Querschnitt L-M. Kiel-Holtenau.

P 4 WSA Kiel-Holtenau (2012d): Alte Schleuse Kiel-Holtenau Querschnitt P-Q. Kiel-Holtenau.

3 Bauwerk

3.1 Allgemeine Beschreibung

Die Alte Schiffsschleusenanlage Kiel-Holtenau ist Teil der Schleusengruppe Kiel-Holtenau, die den Abschluss des Nord-Ostsee-Kanals zur Ostsee bildet.

Bild 1: Draufsicht der Schiffsschleusenanlage Kiel-Holtenau (GeoViewer.WSV)

Die Schiffsschleusenanlage wurde von 1887-1895 gebaut und im Zuge der Eröffnung des Nord-Ostsee-Kanals 1895 in Betrieb genommen. Die beiden Kammern haben jeweils eine Nutzlänge von 125 m und eine Nutzbreite von 22 m bei einer Drempeltiefe von -9,80 m (NHN). Der Wasserstand des NOK liegt bei 0,00 m, was dem Grundwasserstand bei normalem Betrieb entspricht. Die Tide schwankt um den Kanalwasserstand zwischen -1,83 m (NNW) und +2,25 m (HHW), beträgt den Großteil des Jahres aber nur wenige Dezimeter. Die Höhe der Plattform liegt im Kammerbereich bei + 2,77 m.

Unterschieden werden die beiden Seitenmauern (Südmauer der Südkammer, Nordmauer der Nordkammer) sowie die Mittelmauer zwischen den Kammern. In Längsrichtung sind das Außenhaupt, die Außenkammer, das Mittelhaupt, die Binnenkammer, sowie das Binnenhaupt zu unterscheiden. Die Mitteltore wurden in den 1920er Jahren entfernt. Außen- und Binnenhaupt sind jeweils mit Stemmtorpaaren ausgestattet. Die Füllung und Entleerung erfolgt über je zwei Längsläufe mit je zwölf Stichkanälen. Der Normalwasserstand des NOK entspricht in etwa dem mittleren Wasserstand in der Kieler Förde. Die Fallhöhen sind tideabhängig und im Allgemeinen sehr gering (<1m). Die Schleusungszeit beträgt ca. 15-30 Minuten.

Nach dem Bau der Neuen Schiffsschleusenanlage Kiel-Holtenau (Eröffnung 1914), deren Kammern über wesentlich größere Abmessungen verfügen, verloren die Alten Schleusen an Bedeutung und wurden nach dem 1. Weltkrieg und nach Ablieferung des Großteils der deutschen Kriegsflotte als Reparationsleistung stillgelegt.

Im Jahr 1921 wurde die Südkammer erstmals gelenzt mit dem Ziel, sie als Trockendock an die damalige Germania-Werft zu vermieten. In den nächsten Jahrzehnten (1921-1944) war zumindest die Südkammer durchgehend an die Germania-Werft vermietet und diente einerseits der Dockung von Schiffen, andererseits der Dockung der zwölf großen Schiebetore der beiden Neuen Schleusen des NOK (WSD Kiel, 1975; [S5]).

Bild 2: Dockung der großen Schiebetore in der gelenzten Südschleuse, 1970er Jahre (BAW-Bildarchiv)

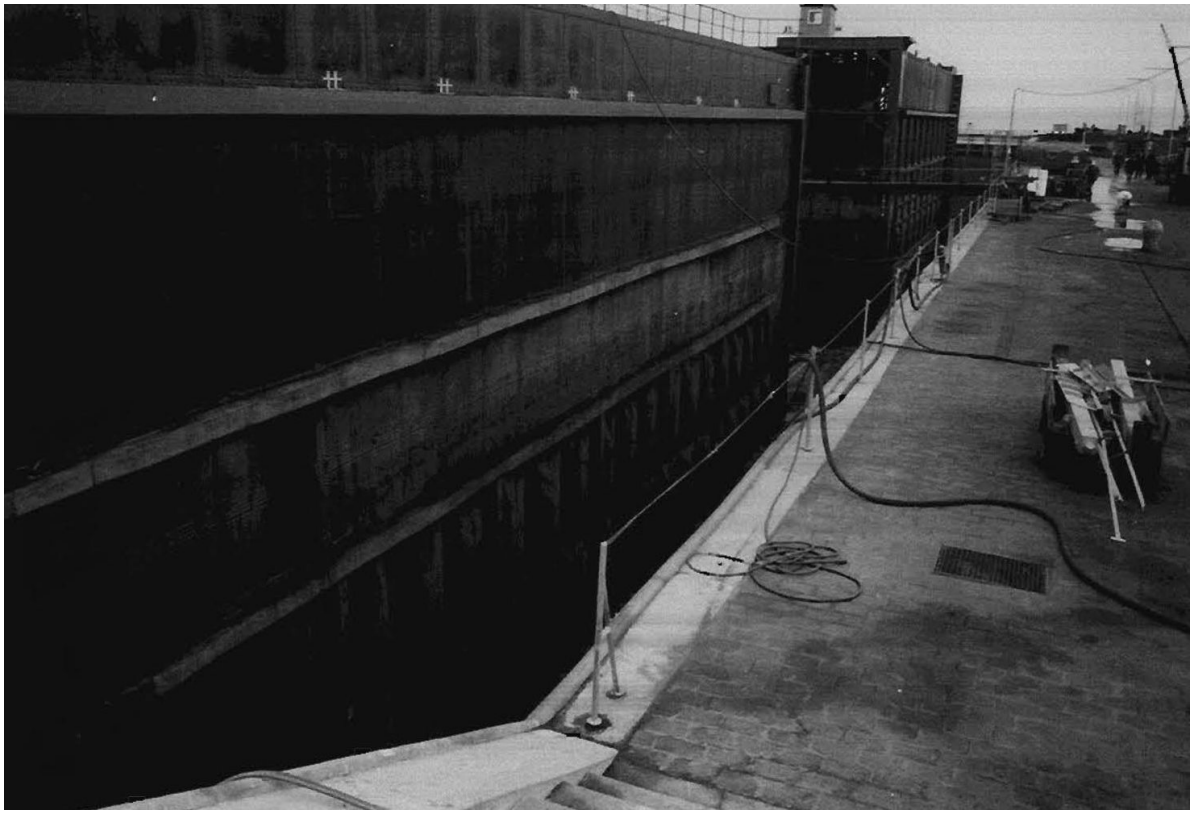

Bild 3: Dockung der großen Schiebetore in der gelenzten Südschleuse, 1970er Jahre (BAW-Bildarchiv)

In den 1950er Jahren gab es erste Überlegungen, die Schleuse für eine erneute bzw. weiterführende Nutzung als Trockendock instand zu setzen. In den 50er bis 70er Jahren wurden die Schleusen jedoch wieder intensiver für Verkehrszwecke genutzt. Die 1974/75 durch das Wasser- und Schifffahrtsamt Kiel-Holtenau durchgeführten Berechnungen zur Tragfähigkeit der instandgesetzten Alten Südschleuse ergaben eine unzureichende Sicherheit der gelenzten Schleusenkammer [S7]. Als Schlussfolgerung wurde eine Fortsetzung des bisherigen Dockbetriebes aus technischen und wirtschaftlichen Gründen ausgeschlossen.

3.2 Konstruktion

Bei der Schleusenanlage handelt es sich um eine Doppelkammerschleuse in Schwergewichtsbauweise. Die Schleusenanlage ist komplett monolithisch errichtet.

Die Schleusenwände bestehen aus einer Vorsatzschale aus Wasserbauklinker, einem Füllmauerwerk sowie in zwei Höhenlagen angeordneten Sparbetonkammern. Die Sohle hat eine Dicke von 3,50 m im Bereich der Häupter und 2,50 m in den übrigen Bereichen und besteht aus Stampfbeton. Sie ist als umgekehrtes Gewölbe ausgebildet.

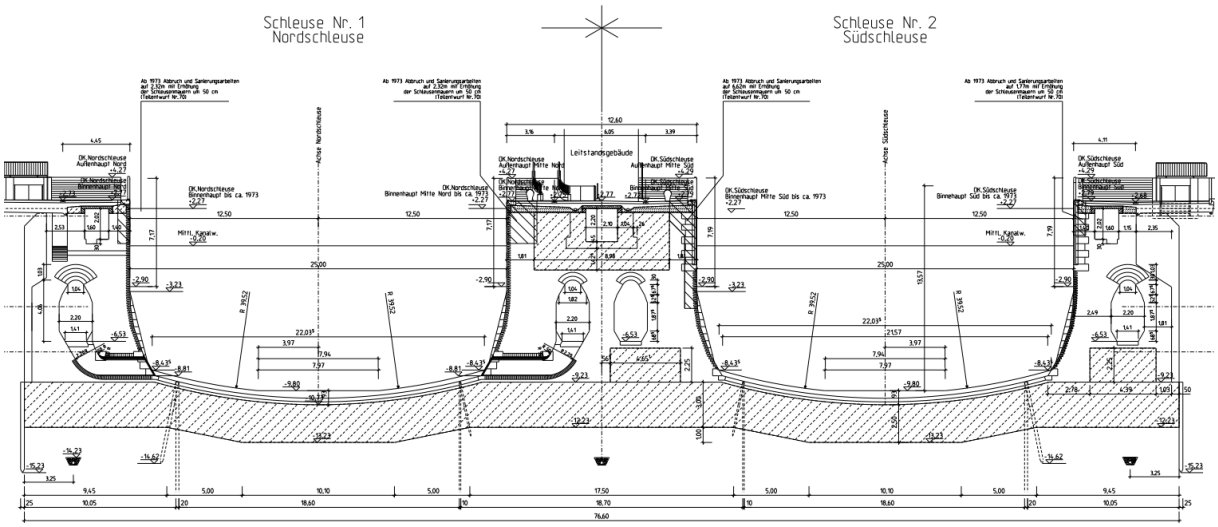

Bild 4: Querschnitt der Schiffsschleusenanlage

Im Rahmen eines Investitionsprogramms zur Anpassung der betrieblichen Anlagen des Nord-Ostsee-Kanals an den gestiegenen Verkehr war eine tiefgreifende Instandsetzung der Alten Schleusen vorgesehen, die eine Erneuerung und Erhöhung der Plattformen beinhaltete. Im Zuge der Arbeiten wurden 1973 gravierende Schäden, insbesondere an der Südseite der Mittelmauer, aufgedeckt. Daraufhin wurden die betroffenen Mauerteile großflächig abgetragen und durch eine Kombination aus Vorsatzschale und Betonhinterfüllung saniert. Die Instandsetzung wurde ergänzt durch Kernbohrungen, Materialprüfungen und eine Begehung der für diesen Zweck erstmalig seit 1927 gelenzten Nordkammer. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden auch die Tornischen im Mittelhaupt verschlossen, im unteren Bereich mit Stahlbeton, im oberen Bereich mit einer Kombination aus Vorsatzschale und Betonhinterfüllung. Der obere Wandbereich wurde entsprechend der restlichen Schleusenwand verklinkert. Im unteren, nicht verklinkerten Bereich ist zwischen dem Beton und dem ursprünglichen Altmauerwerk eine Drainageschicht aus Filtersteinen anzutreffen.

Bei der Wiederinbetriebnahme der alten Schleuse im Jahr 1976 war lediglich der 1. Bauabschnitt der geplanten Instandsetzung durchgeführt worden. Der untere Wandbereich ab Beginn der Sohlwölbung sowie die Kammersohle sollten in einem 2. Bauabschnitt streifenweise saniert werden. Diese Arbeiten sind bis heute nicht durchgeführt worden.

4 Zustand des Bauwerks

4.1 Südkammer

4.1.1 Untersuchungsumfang

In der Schleusenkammer wurden im Mai 2013 folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Begehung der trockengelegten Schleusenkammer inklusive Längsläufe und Verbindungsgang
- Georadar
- 45 Horizontalbohrungen
- (4,00 m Länge im Bereich der Mittelhäupter, 1,50 m in allen übrigen Bereichen)
- Videoskopie der Bohrlöcher
- Anlegen von drei Wandöffnungen zur Untersuchung der instandgesetzten Kammerwandbereiche
- Messprogramm des WSA

4.1.2 Ergebnis

Die Beschreibung des Zustands erfolgt ausführlich in Anlage 1 und wird hier nur zusammenfassend wiedergegeben.

Trotz der augenscheinlich guten Gesamterscheinung der rund 120 Jahre alten Schleuse wurden im Rahmen der Begehung und der Untersuchungen zahlreiche, teilweise schwerwiegende Schäden in der Kammerwand festgestellt.

Zusammenfassend treten in nahezu allen Wandbereichen systematisch Klüfte mit einer Breite von bis zu mehreren Zentimetern oberflächenparallel in gleicher Tiefe auf. Die Klüfte beginnen in einer Tiefe von 30-40 cm und erreichen dort Breiten von 3-4 cm, im Bereich der Außenkammer in der Südwand 5-8 cm. Die Klüfte sind häufig mit losen Bruchstücken gefüllt. Teilweise ist ein vertikaler Versatz in der Kluft im Zentimeterbereich erkennbar. Dahinter befinden sich in den meisten Fällen breite, verzweigte Risse. In manchen Bohrlöchern ist das Mauerwerk auf der gesamten Bohrlochlänge durch zahlreiche Risse und schmale Klüfte zersetzt. Auffällig ist, dass die Risse nicht nur im Bereich der Fugen verlaufen sondern sehr häufig durch die Ziegelsteine. Hinzu kommen stellenweise Risse in Bohrlochlängsrichtung sowie Schrägrisse innerhalb einzelner Mauersteine. Die Bohrlöcher sind teilweise feucht, teilweise besteht Wasserzutritt von hinten und oben.

Ausgenommen von der Schädigung sind lediglich die instandgesetzten Wandbereiche der Nordwand in der Binnen- und der Außenkammer. Hier ist jedoch anzumerken, dass die instandgesetzten Wandbereiche auf vorgeschädigtem, zerklüftetem Mauerwerk aufsitzen.
Darüber hinaus ist festzustellen, dass in den Bohrlöchern kein Verbund zwischen Vorsatzschale und Füllbeton bzw. Füllbeton und Altmauerwerk festgestellt werden kann. Es besteht damit die Gefahr der Korrosion an der Verankerung der Vorsatzschale.

In den verfüllten Tornischen sind Risse und Ablösungen zwischen Beton und Altmauerwerk vorhanden. Die in den anderen Kammerwandbereichen vorgefundene Klüftung tritt hier hinter der Verfüllung im Altmauerwerk auf.

Das WSA Kiel-Holtenau hat zur Überwachung der Südkammer während der Trockenlegung ein geodätisches Monitoring eingerichtet. Bestandteile des Messprogramms sind

- Polare 3D-Bestimmung
  - von 5 Messpunktpaaren zur Bestimmung der Kammerweite,
  - von 5 Sohlenpunkte zur Überwachung der Sohle und
  - von 2 Punkten an den Revisionsverschlüssen;
- 11 Grundwassermessstellen;
- je ein Pegel für Förde- und Kammerwasserstand;
- 5 Neigungsmessungen im südlichen Verbindungsgang wegen vorhandener Rissbildung;
- 5 Fissurometer zur Überwachung der Verschiebungen an dem Riss im südlichen Verbindungsgang.

Die Messwerte wurden stündlich erfasst. Vom WSA wurden 3 Limitklassen festgelegt (grün – gelb – rot), wobei die Limitklasse rot Alarmierungswerte anzeigt, die ein Handeln erfordern.

Die Messungen wurden vom WSA einer ersten Auswertung unterzogen (Vermerk 3-261.6/12 vom 14.06.2013). Danach bewegen sich die Zielgrößen bis auf wenige Ausnahmen in der grünen Limitklasse. Die rote Limitklasse wurde nicht erreicht.

Die Kammerwände bewegen sich bei Lenzung der Schleusenkammer um 5-6 mm nach außen [S17]. Bei der Flutung der Kammer lässt sich ein Trend zur Reduktion der Kammerweiten erkennen, d.h. die Kammerwände bewegen sich zurück zur Schleusenkammermitte. Dies resultiert aus dem vertikalen Wasserdruck auf die Voute im unteren Kammerwandbereich sowie aus der Verkrümmung der Bodenplatte.

4.2 Nordkammer

4.2.1 Untersuchungsumfang

Angesichts der in der Südkammer festgestellten, schwerwiegenden Schäden wurde in der Nordkammer der Alten Schleuse Kiel-Holtenau ein Bohrprogramm einschließlich videoskopischer Bohrlochuntersuchung angeordnet. Von einer zunächst vorgesehenen Trockenlegung der Nordkammer wurde wegen erheblicher Tragfähigkeitsbedenken Abstand genommen. Stattdessen wurde in einem ersten Schritt der Wasserstand in der Kammer um 2,50 m abgesenkt. Es wurden 14 Bohrungen, verteilt auf beide Kammerwände, vorgenommen. Anschließend wurde der Kammerwasserstand um weitere 2,50 m abgesenkt und weitere 14 Bohrungen durchgeführt. Alle Bohrlöcher wurden mit einer Kamera befahren.

Zusätzlich wurden bei der Absenkung um 5 m die Kammerwandoberflächen in Augenschein genommen und fotografisch dokumentiert.

4.2.2 Ergebnis

Die Beschreibung des Zustands erfolgt ausführlich in Anlage 2 und wird hier nur zusammenfassend wiedergegeben.

Grundsätzlich sind die angetroffenen Schäden in der Nordkammer von gleicher Art wie in der Südkammer, in ihrem Ausmaß aber nicht vergleichbar mit den breiten Rissen und Klüften, die in der Südkammer festgestellt wurden. Dennoch sind Rissbildung mit Rissbreiten bis zu 1 cm sowie verzweigte Risse mit Tendenz zur Klüftung zu erkennen. Viele Bohrlöcher weisen Wasserzutritt auf.

Breite Risse treten in erster Linie im Bereich der Häupter auf. Dabei sind die Risse in den Bohrungen der oberen Lage (ca. NN -0,20 m) wesentlich ausgeprägter als in der tieferen Lage (ca. NN -2,60 m). Aber auch in der tiefen Lage sind Risse bzw. beginnende Rissbildung meist in den Mauerziegeln zu erkennen.

Im Bereich der Binnen- und Außenkammer sowie im Bereich des Mittelhauptes haben die Bohrungen in der oberen Lage nur instandgesetzte Bereiche erfasst. Dort besteht in den meisten Fällen kein Verbund zwischen Füllbeton und Altmauerwerk. In den hinteren Bereichen der Bohrungen im Altmauerwerk sind nur kleinere Risse bzw. lokal begrenzte Risse in Mauerziegeln oder Fugen zu erkennen.

Die Bohrungen in der tieferen Lage zeigen ebenfalls nur Risse mit geringen Rissbreiten bzw. beginnende oder lokal begrenzte Rissbildung.

Im Vergleich mit der Südkammer zeigt sich damit ein ähnlicher bzw. derselbe Schadensmechanismus, allerdings haben die Schäden eine geringere Ausprägung. Vermutlich ist die Temperaturbeanspruchung für die Ausprägung der Schäden verantwortlich. So ist plausibel, warum die Nutzung der Südkammer als Trockendock die Schäden signifikant verschärft hat und warum in der Nordkammer die Schäden in den oberen Bereichen (Freibord) stärker ausgeprägt sind als weiter unten.

5 Materialuntersuchungen

5.1 Ergebnisse früherer Untersuchungen

Umfangreiche Materialuntersuchungen an der Alten Schleuse Kiel-Holtenau wurden erstmals im Zusammenhang mit der Begutachtung in den 1990er Jahren durchgeführt.

Für ein erstes Gutachten (BAW, 1992) wurden ca. 207 lfd. m Vertikalbohrkerne der südlichen und der nördlichen Kammerwand entnommen. Daraus konnten 626 Prüfkörper gewonnen werden, die im Anschluss verschiedenen physikalischen und chemischen Untersuchungen unterzogen wurden. Die Prüfkörper zur Bestimmung der Mauerwerkskennwerte entstammten nur dem Füllmauerwerk.

Die Mauersteine wurden der Druckfestigkeitsklasse 6 und der Rohdichteklasse 1,8 zugeordnet, der Mauermörtel der Mörtelgruppe III. Die Haftscherfestigkeit wurde zu β_{RHS} = 0,16 N/mm² ermittelt. Für die Nachrechnung wurde ein Grundwert der zulässigen Druckspannung von σ_0 = 2,9 N/mm² empfohlen.

Da die statische Nachrechnung mit den ermittelten Kennwerten Defizite im Bereich der Schubtragfähigkeit identifizierte, erfolgte im Anschluss eine vertiefte Betrachtung der Materialkennwerte, die Einfluss auf die Schubtragfähigkeit haben. Die Untersuchungen sind in BAW (1993) dokumentiert.

Im Rahmen der Untersuchung wurde an noch vorhandenem Bohrmaterial die Steinzugfestigkeit zu β_{RZ} = 0,5 N/mm² ermittelt. Die Bewertung der Ergebnisse vor dem Hintergrund der Schubtragfähigkeit zeigt, dass nur durch Ansatz der Mittelwerte für Kohäsion und Steinzugfestigkeit die erforderliche Steigerung der rechnerischen Tragfähigkeit erreicht werden kann. Normenkonform wäre der Ansatz der 5%-Quantile, die unter Ansatz einer Normalverteilung ermittelt wurden. Die lange, unauffällige Standzeit und die vermeintliche Schadensfreiheit des Bauwerks wurden als Begründung für die Wahl des günstigeren Mittelwert-Ansatzes angeführt.

5.2 Ergebnisse aktueller Untersuchungen

Im Rahmen der aktuellen Begutachtung wurden weitere Materialuntersuchungen durchgeführt, um

- erstmals Kennwerte für die Vorsatzschale zu bestimmen,
- erstmals Kennwerte für die Steifigkeit des Mauerwerks zu ermitteln,
- durch den Abgleich mit den vorangegangenen Untersuchungen eine gegebenenfalls vorhandene Degradation aufzudecken und
- abgesicherte Materialparameter für tiefergehende statische Analysen festzulegen.

Für die Materialuntersuchungen wurden 45 Horizontalbohrungen der Südkammer verwendet, die im April 2013 gebohrt wurden. In der Regel weisen die Bohrkerne eine Länge von 1,50 m auf. Lediglich 9 Bohrkerne im Bereich des ehemaligen Mittelhauptes wurden auf Grund der durchgeführten Auffüllung der Torkammern mit einer Tiefe von 4 m ausgeführt. Die Gesamtlänge der Bohrkerne ergibt ca. 90 m.

Die Anzahl der daraus gewonnenen Probekörper liegt mit 112 deutlich unterhalb der Anzahl der 1992 untersuchten Probekörper (626 Stück). Zusätzlich ist zu beachten, dass bei der Untersuchung von Mauerwerk auf Grund des anisotropen Aufbaus die Beanspruchungsrichtung in Bezug zur Ausrichtung des Mauerwerks berücksichtigt werden muss. Dies führte dazu, dass aus den horizontalen Bohrkernen vertikale Versuchskörper gewonnen werden mussten, die im Ergebnis deutlich geringere Abmessungen als die 1992 aus den vertikalen Bohrkernen gewonnenen Versuchskörper hatten.

Die Probengewinnung, die Versuchsanordnung, der Versuchsablauf und die gewonnenen Kennwerte sind in Anlage 4 ausführlich beschrieben.

Im Ergebnis wird außerhalb der geschädigten Bereiche die Festigkeit der früheren Untersuchungen bestätigt. Es zeigt sich, dass die Vorsatzschale gegenüber dem Füllmauerwerk eine deutlich höhere Festigkeit besitzt.

Für die FE-Berechnung des Schleusenquerschnitts werden ein E-Modul für die Vorsatzschale von E_V = 30.000 N/mm² und ein E-Modul für das Füllmauerwerk von E_F = 22.000 N/mm² angegeben, die sich aus den Mittelwerten der Versuchsergebnisse ergeben haben.

Für die statischen Nachweise werden vom Füllmauerwerk die Parameter Druckfestigkeit des Mauerwerks, Haftscherfestigkeit des Mauerwerks und Zugfestigkeit des Mauerziegels benötigt. Gegenüber den Untersuchungen der 1990er Jahre besitzen die aktuellen Untersuchungen folgende Nachteile, die im Wesentlichen aus der ungünstigen Geometrie der Bohrkerne bzw. der Prüfkörper resultieren:

- wesentlich kleinere Abmessungen der Prüfkörper,
- geringere Prüfkörperanzahl,
- Bestimmung der Haftzugfestigkeit als Vergleichswert für die Haftscherfestigkeit und
- Bestimmung der Spaltzugfestigkeit als Vergleichswert für die zentrische Zugfestigkeit.

Im Ergebnis liegen die Kennwerte der aktuellen Materialuntersuchungen etwas unterhalb der Kennwerte der 1990er Untersuchungen, weshalb die 1990er Ergebnisse einer neuerlichen Auswertung unterzogen wurden.

Gemäß aktuellem Stand der Technik wird bei stark streuenden Kennwerten eine logarithmische Normalverteilung als Verteilungsfunktion empfohlen. Stauder, 2011, empfiehlt diesen Ansatz ab einem Variationskoeffizienten von v_x = 0,20, was im vorliegenden Fall mit 0,24 < v_x < 0,69 gegeben ist. Dieser Ansatz vermeidet darüber hinaus negative 5%-Quantilwerte, die sich bei relativ kleinen Kennwerten ergeben können.

Im Rahmen der aktuellen Materialuntersuchungen wurden die günstigeren Kennwerte der 1990er Untersuchung, die ursprünglich unter Ansatz einer Normalverteilung ausgewertet wurden, auf Basis der günstigeren Log-Normalverteilung erneut untersucht. Es ergeben sich damit folgende Materialkennwerte für die statischen Nachweise:

- Nennfestigkeit des Mauerwerks $\beta_{M,0,05}$ = 14,4 N/mm²,
- Haftscherfestigkeit des Mauerwerks $\beta_{HS,0,05}$ = 0,27 N/mm²,
- zentrische Steinzugfestigkeit $\beta_{RZ,0,05}$ = 0,70 N/mm².

6 Statische Untersuchungen

Die VV-WSV 2101 (2010), § 4(1), verlangt von Bauwerken in der Unterhaltungslast der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung eine Bestandsstatik. Da für öffentliche Gebäude kein Bestandsschutz gilt, ist unter Bestandsstatik

- eine entsprechend den Fortschreibungen der allgemein anerkannten Regeln der Technik bewertete Ursprungsstatik (bzw. eine zu einem späteren Zeitpunkt erstellte Statik) oder
- eine entsprechend den allgemein anerkannten Regeln der Technik erstellte, aktuelle Statik

zu verstehen. Damit wird sichergestellt, dass die Anlagen an den Bundeswasserstraßen den Anforderungen an Sicherheit und Ordnung nach §48 WaStrG (1968) genügen.

Eine detaillierte Beschreibung und Analyse der in der Vergangenheit durchgeführten Berechnungen und der aktuellen statischen Untersuchungen ist in Anlage 5 zu finden.

Für die Alte Schiffsschleusenanlage Kiel-Holtenau konnte in den Unterlagen keine Ursprungsstatik gefunden werden.

6.1 Ergebnisse früherer Untersuchungen

In den 1970er Jahren wurden aufgrund der vorgefunden Schäden überschlägliche statische Berechnungen durchgeführt, die erste Defizite im Hinblick auf die Kippsicherheit und die Schubtragfähigkeit aufzeigten [S1;S7]. Eine weitere Berücksichtigung dieser Erkenntnisse konnte mit den Unterlagen nicht nachvollzogen werden.

Es liegen statische Berechnungen aus den 1990er Jahren vor [S13; S15], die wohl auch durch einen Prüfingenieur geprüft wurden, wie ein im Entwurf vorliegendes Schreiben vermuten lässt [S14]. Die Grundlagen für die statischen Berechnungen wurden durch die BAW vorgegeben (BAW, 1988; BAW, 1990a; BAW, 1990b; BAW, 1990c; BAW, 1990d; BAW, 1992; BAW, 1993), nachdem eine erste Berechnung mit dem Ziel, die Nutzung als Trockendock statisch nachzuweisen, nicht zielführend war [S11; S12]. Auch die anschließenden Nachweise wurden in einem iterativen Prozess geführt. Es wurde versucht, die sich rechnerisch weiterhin ergebenden Defizite sukzessive durch genauere Materialuntersuchungen zu kompensieren.

Die statischen Berechnungen erfüllen die Anforderungen an eine Bestandsstatik nur bedingt, da

- mit Eigengewicht, Erddruck, Grund- und Kammerwasser nur die signifikanten Einwirkungen berücksichtigt werden und damit weitere Einwirkungen wie Verkehrslasten, Eisdruck, Schiffsanlegedruck etc. fehlen,

- die Wirkung des Längslaufs als Öffnung im Ersatzquerschnitt nicht berücksichtigt wird und die dadurch entstehenden Zusatzmomente im Rahmen vernachlässigt werden und
- nur dieser Ersatz-Kammerquerschnitt zur Berücksichtigung der vermeintlichen räumlichen Tragwirkung untersucht wird; detaillierte Berechnungen zu den Häuptern liegen nicht vor.

Die Nachweisformate entsprechen aber unabhängig von den im Folgenden beschriebenen Defiziten den aktuell anerkannten Regeln der Technik.

Bei der Analyse der Berechnungen [S13; S15] sind die im Folgenden beschriebenen Defizite aufgefallen:

Modellbildung:

- durch die Modellierung des Ersatzquerschnittes wird das Tragverhalten des durch den Längslauf reduzierten Querschnitts nicht realistisch erfasst; die Rahmentragwirkung führt zu einer stärkeren Beanspruchung der Wände im Bereich oberhalb und seitlich des Längslaufs.
- die räumliche Tragwirkung wird durch den Ersatzquerschnitt deutlich überschätzt; das Verhältnis zwischen Höhe des Kammerwandabschnitts und Länge zwischen den steiferen Häuptern ist mit 1:3 so gering, dass der mittlere Kammerwandbereich keine Entlastung durch die steiferen Häupter erfährt.

Nachweise:

- die statischen Nachweise wurden nur in zwei Schnitten unterhalb des Längslaufs geführt (NN -9,23m und NN -8,81 m, siehe Bild 7), was auf Grund der gewählten Modellierung sinnvoll ist, die höherbeanspruchten Bereiche des Querschnitts aber nicht erfasst.
- der Schubnachweis konnte nur unter Ansatz des Mittelwertes für die Kohäsion und die Haftzugfestigkeit geführt werden; der Ansatz wird in BAW (1993) mit der langen, unauffälligen Standzeit und der Schadensfreiheit des Bauwerks begründet.
- entgegen der Empfehlung in BAW (1993) wurde der Schubnachweis ohne Sicherheitsbeiwert mit γ = 1,0 geführt, gefordert ist γ = 2,0.

Zusammenfassend weist die Analyse von [S15] damit Tragfähigkeitsdefizite auf, die sich bereits mit den Berechnungen in [S7] andeuteten.

6.2 Ergebnisse aktueller Untersuchungen

Um die Tragfähigkeit einschätzen zu können, wurden im Rahmen dieses Gutachtens Vergleichsrechnungen mit zweidimensionalen FE-Modellen durchgeführt. Die Untersuchungen sind ausführlich in Anlage 5 beschrieben. Die Ergebnisse ermöglichen eine gutachterliche Bewertung der Tragfähigkeit bzw. vorhandener Defizite, stellen aber aufgrund der eingangs erläuterten Sachlage ebenfalls keine Bestandsstatik dar. Ebenso wird in dem Rechenmodell zunächst keinerlei Schädigung des Querschnitts, wie sie in der Realität in massiver Form vorgefunden wurde, berücksichtigt. Zur Einschätzung der Auswirkung der Schädigung werden abschließend Vergleichsberechnungen unter Vernachlässigung der geschädigten Bereiche geführt.

Es wurden die Seitenmauer (Bild 5) und die Mittelmauer (Bild 6) mit ihrer tatsächlichen Geometrie unter Berücksichtigung der vorhandenen Öffnungen (Längslauf, Betriebsgang) abgebildet und am unteren Ende in die Sohle eingespannt. Es wurde ein linear-elastisches Materialgesetz verwendet. Die unterschiedlichen Materialien der Vorsatzschale, des Füllmauerwerks und des Füllbetons wurden mit ihren Steifigkeiten und ihrem Eigengewicht berücksichtigt.

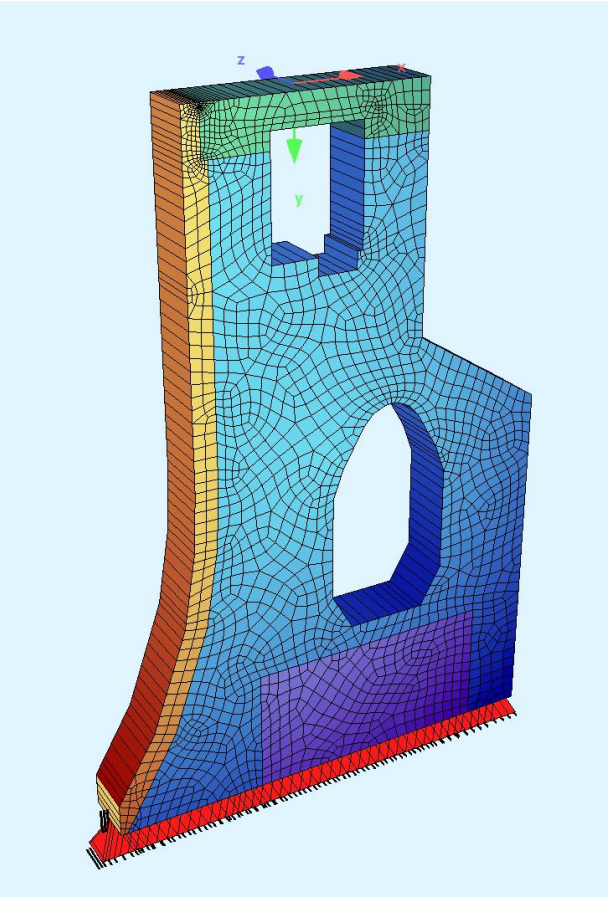

Bild 5: FE-Modell der Seitenmauer

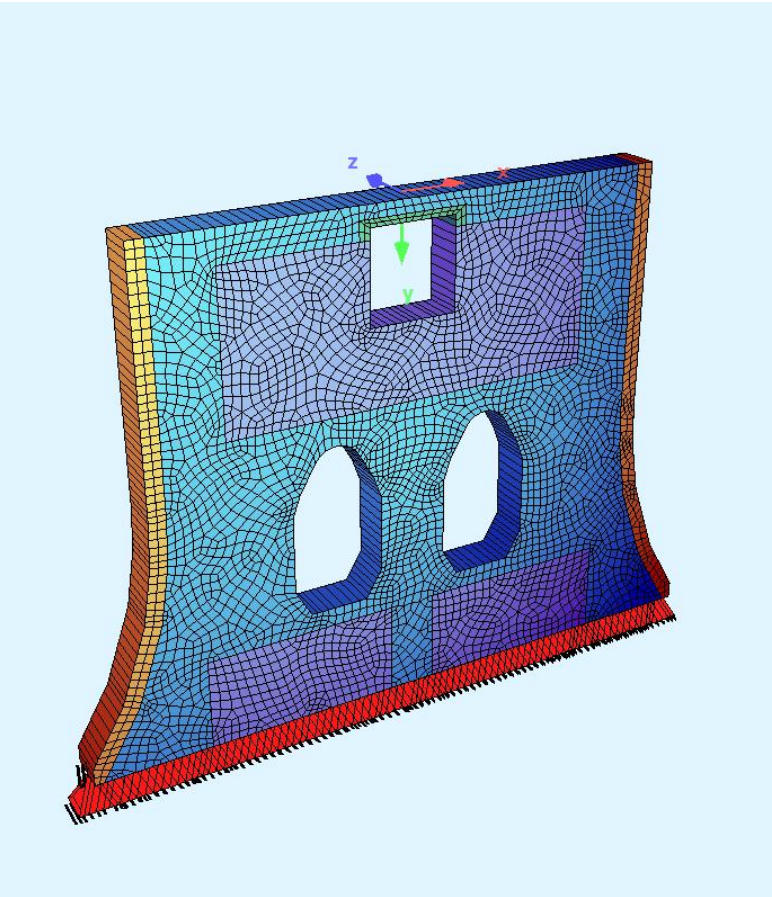

Bild 6: FE-Modell der Mittelmauer

Der Erdruhedruck, das Grundwasser und der Kammerwasserstand wurden als äußere Einwirkungen erfasst. Folgende Wasserstände wurden in den Einwirkungskombinationen untersucht (s.a. Anlage 5, Anhang 3):

für die Seitenmauer:

- Betrieb I: Kammer NN -1,83 m, Grundwasser NN ±0,00 m
- Revision: Kammer leer, Grundwasser NN -3,50 m
- Betrieb II: Kammer NN -0,70 m, Grundwasser NN ±0,00 m
- Betrieb III: Kammer NN +0,00 m, Grundwasser NN ±0,00 m

für die Mittelmauer:

- Betrieb I: Nordkammer NN +2,25 m, Südkammer NN -0,50 m
- Revision I: Nordkammer NN +2,25 m, Südkammer leer
- Betrieb I: Nordkammer NN +2,25 m, Südkammer NN -0,50 m, Schiffsanlegedruck
- Revision I: Nordkammer NN +2,25 m, Südkammer leer, Schiffsanlegedruck

Die Nachweise werden nach dem genauen Berechnungsverfahren der DIN 1053-1:1996-11, dort Absatz 7.9, geführt. Entsprechend sind folgende Nachweise zu führen:

- Nachweis zur Begrenzung der klaffenden Fuge unter Berücksichtigung von Riss- und Porenwasserdruck,
- Nachweis der zulässigen Druckspannungen,
- Nachweis der zulässigen Schubspannungen.

Gegenüber den statischen Berechnungen in [S13] werden vier relevante Schnitte im Querschnitt der Seitenmauer untersucht, siehe Bild 7.

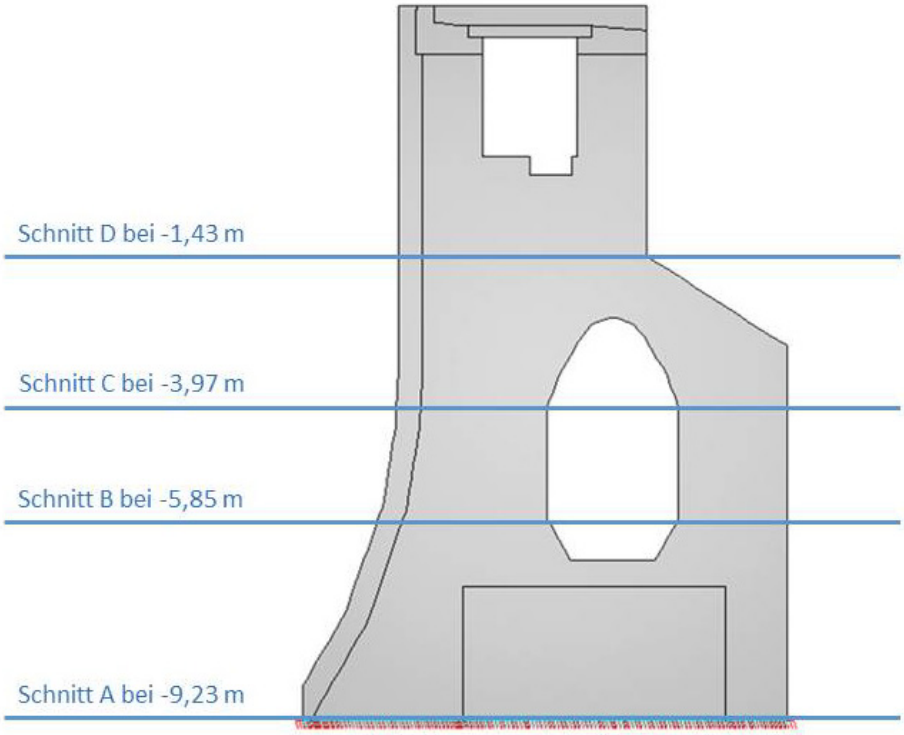

Bild 7: Untersuchte Schnitte im Querschnitt der Seitenmauer

Im Ergebnis ist festzustellen, dass die Tragfähigkeit der Schleusenmauern – unabhängig von den vorgefundenen Schäden – auch unter Anwendung des genaueren FE-Modells nicht gegeben ist. Sowohl im Betriebs- als auch im Revisionszustand stellt sich in den Seitenmauern ein Aufreißen des Riegels über dem Längslauf ein, Bild 8. Klaffende Fugen treten in nahezu allen untersuchten Schnitten auf, wobei der Querschnitt teilweise in rechnerisch unzulässiger Weise bis über den Schwerpunkt hinaus aufreißt, Bild 9. Besonders bemerkenswert ist hier, dass sich dabei die Verhältnisse im Betriebszustand schlechter darstellen als im Revisionszustand.

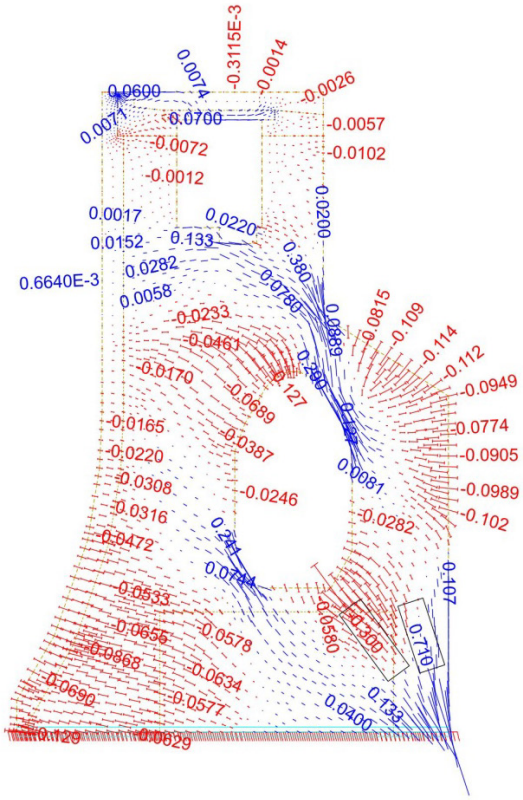

Bild 8: Ebene Hauptspannungen im Betriebslastfall

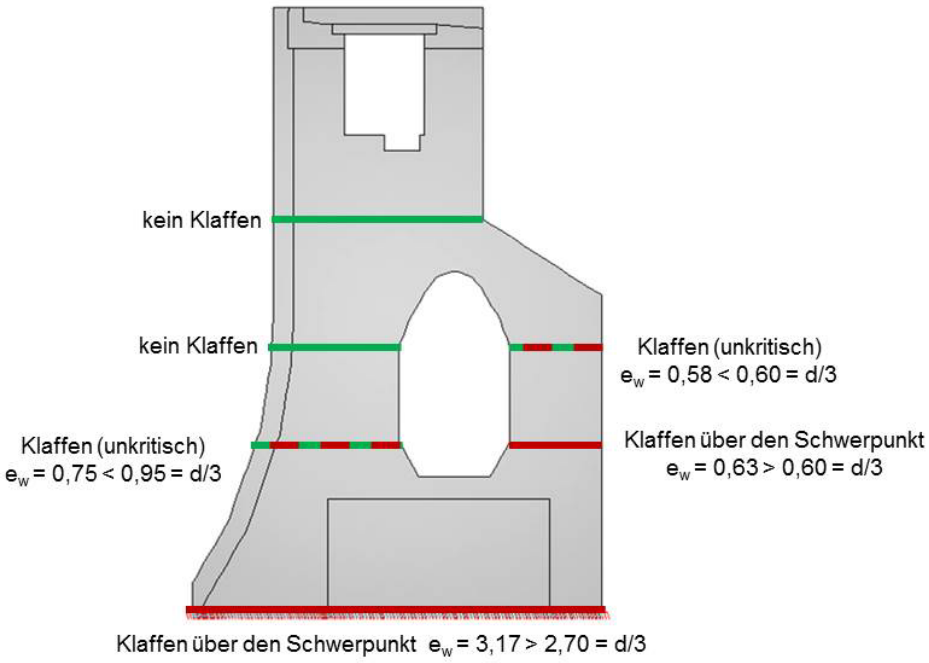

Bild 9: Auswertung der Ausmitte im Betriebslastfall

Der bei der Begehung vorgefundene und durch die Berechnung bestätigte Firstriss im Längslaufgang der Seitenmauer, sowie die über den Stichkanälen der Seitenmauer auslaufende Schädigung deuten auf ein Abscheren des vorderen Wandfußes hin.

Gravierende Defizite weist bei der Seitenmauer der Nachweis der zulässigen Schubspannungen auf, siehe Bild 10, linker Querschnitt. Die Berechnungsergebnisse sowie das aufgetretene Schadensbild deuten darauf hin, dass die Lagerfugen auf Reibung versagt haben bzw. die Ziegel infolge Schubbeanspruchung auf Zug versagt haben. Dieses Versagen wird durch das Aufreißen des Riegels über dem Längslauf noch begünstigt. Auch die zwischen den Stichkanälen angeordneten Sparbetonkammern unterstützen das Abscheren des vorderen Wandfußes. Darüber hinaus sorgen die Sparbetonkammern in beiden Höhenlagen durch Arbeitsfugen und Steifigkeitssprünge für eine Unterbrechung des monolithischen Querschnitts.

Für die Mittelmauer erzeugen die beschriebenen Einwirkungen keine Überbeanspruchung des Querschnitts. Allerdings führen zusätzliche Einwirkungen wie Schiffsanlegedruck in einer Kammer, Eisdruck oder vertikale Verkehrsauflasten zu einer mit der Seitenmauer vergleichbaren Überbeanspruchung.

Die beiden Schleusenkammern der Alten Schleuse Kiel-Holtenau weisen damit bereits im ungeschädigten Zustand unter Ansatz der günstigsten Kennwerte des ungeschädigten Materials bei der Untersuchung eines Querschnitts, der nur mit wenigen Basis-Einwirkungen beansprucht ist, erhebliche Sicherheitsdefizite auf. Die geforderte Sicherheit ist daher für dieses Bauwerk bereits im schadensfreien Zustand nicht gegeben, Nachweise auf dem Niveau einer Bestandsstatik sind nicht vorstellbar.

In diesem Sinne belegen auch die geführten Berechnungen mit einem um die Schädigung reduzierten Querschnitt zu einer signifikanten Zunahme der Überbeanspruchung. Beispielhaft zeigt Bild 10 für den Betriebslastfall die Zunahme des Auslastungsgrades für die Schubtragfähigkeit bei zunehmender Berücksichtigung der Schädigung. Der linke Querschnitt zeigt für den ungeschädigten Querschnitt eine Überschreitung der Schubtragfähigkeit im untersten Schnitt um den Faktor 2,57. Für die Berechnung des mittleren Querschnitts wurde kammerseitig eine Schale von 40 cm entfernt, was zu einer Zunahme der Überschreitung auf den Faktor 2,67 führt. Im rechten Querschnitt wurde die entfernte Schale auf 80 cm verbreitert. Es zeigt sich dann, dass im hinteren Riegel die resultierende Kraft außerhalb des Querschnitts steht, so dass im Querschnitt keine Druckzone zur Übertragung der Schubspannungen verbleibt.

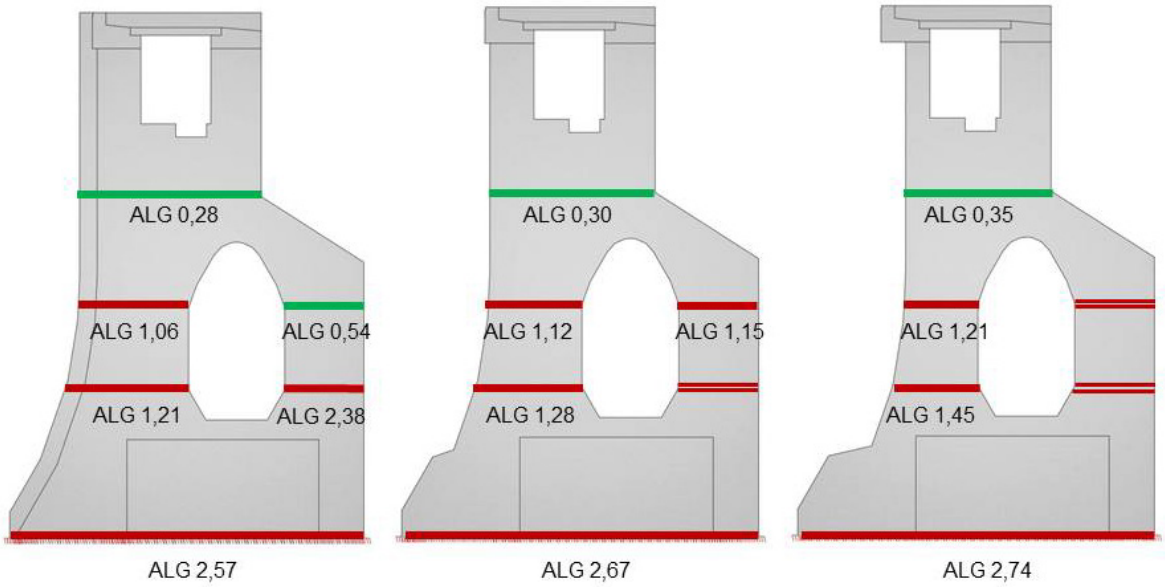

Bild 10: Auslastungsgrad der Schubtragfähigkeit im Betriebslastfall mit Schädigung

6.3 Ergebnisse der nichtlinearen Analyse

Da Mauerwerk auf Grund seines nichtlinearen und anisotropen Verhaltens durch Umlagerungen Tragreserven gegenüber einer linear-elastischen Berechnung aufweisen kann, wurden entsprechende Berechnungen beauftragt. Ziel war es auch, eine Begründung für die 120jährige Standzeit des Bauwerks zu bekommen und eine Größenordnung für die vorhandene Sicherheit zu ermitteln. Dabei wird nur die Seitenmauer betrachtet.

Die Berechnungen wurden von der Fa. Dynardo, Weimar, durchgeführt. Die Ingenieur-Consulting-Gesellschaft ist spezialisiert auf numerische Berechnungen und Simulationen und betreibt eigene Programmentwicklungen. Der zuständige Projektleiter hat auf dem Gebiet des Mauerwerksbaus promoviert (Schlegel, 2004).

Die Ergebnisse der beauftragten Berechnungen zur Seitenmauer sind zusammen mit einer Auswertung in Anlage 6 dokumentiert.

Die Berechnungen wurden mit einem zweidimensionalen FE-Modell und einem nichtlinearen Materialmodell, das die Anisotropie und die speziellen Versagensarten des Mauerwerks (Druckversagen, Zugversagen, Schubversagen in Stein, Mörtel, Verbund) integral beschreibt, durchgeführt. Es wurden die gleichen Einwirkungen berücksichtigt, die auch beim linear-elastischen Modell des Abschnitts 6.2 angesetzt wurden. Die vorhandene Klüftung wurde durch eine 70%ige Schädigung des flächigen Verbundes zwischen Vorsatzschale und Füllmauerwerk abgebildet.

Zu beachten ist, dass diese nichtlinearen Berechnungen aktuell normativ nicht geregelt sind. So wird beispielsweise die Haftzugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge angesetzt, die normativ explizit ausgeschlossen wird, DIN 1053-1 (1996). Der Ansatz der Haftzugfestigkeit beeinflusst den Risswasserdruck und damit die Nachweise der Schubtragfähigkeit erheblich. So belegt auch die Sensitivitätsanalyse der nichtlinearen Berechnung den signifikanten Einfluss der Haftzugfestigkeit.

Im Ergebnis kann belegt werden, dass das Tragsystem mit einem Lastfaktor von 1,0 ein Gleichgewicht findet. Damit ist nachgewiesen, warum das Bauwerk seit 120 Jahren in Betrieb ist, ohne dass globales Versagen eingetreten ist.

Um die Sicherheit abschätzen zu können, wurde anschließend die Last gesteigert. Bei einem Kammerwasserstand von NN -1,83 m und einem Grundwasserstand von NN ±0,00 m versagt das Tragsystem bei einem Lastfaktor von 1,54. Bei einem ausgeglichenen Wasserstand zwischen Kammer und Grundwasser (beides auf NN ±0,00 m) ist nur eine Steigerung auf einen Lastfaktor von 1,64 möglich. Der Revisionszustand ist günstiger und ermöglicht eine Laststeigerung bis zu einem Faktor von 2,0.

Die normativ geforderte Sicherheit beträgt 2,0. Allerdings ist zu beachten, dass die Berechnungen nur eine Abschätzung des Tragsystems darstellen. Es müssen Annahmen getroffen werden, die durch Materialuntersuchungen nicht überprüfbar sind, wie z.B. einzelne Parameter des Materialmodells und die Schädigung durch den klaffenden Riss. Die entsprechenden Werte wurden ingenieurmäßig festgelegt. Neben dem klaffenden Riss parallel zur Kammerinnenseite werden weitere Schädigungen, wie z.B. die bei der Videoskopie-Untersuchung festgestellten, weiteren Risse im Innern des Mauerwerks, im Modell nicht berücksichtigt.

Das Tragsystem versagt durch zwei Effekte:

- im erdseitigen Firstbereich des Längskanals verhindert Rissbildung senkrecht zur radial ausgerichteten Lagerfuge des Gewölbes eine biegesteife Rahmenwirkung des Querschnitts; diese Rissbildung hat sich bereits bei der Begehung des Längskanals gezeigt.
- in der Folge führt eine Überbeanspruchung am Fuß der Wand zwischen Kammer und Längskanal zu einem Zug- und Schubversagen in der Lagerfuge. Dies zeigt sich in der Schleusenkammer durch das Abscheren der Kammerwand oberhalb der Zuläufe sowie im Längskanal an Versätzen in der kammerseitigen Wand.

Diese Versagensmechanismen sind am Bauwerk bereits eingetreten, wie die Zustandsaufnahme eindrucksvoll belegt. Zu erkennen am Bauwerk sind ein durchgehender

Riss im erdseitigen First des Längslaufes sowie ein Versatz an der kammerseitigen Wand des Längslaufes im Längslauf und außen an der Kammerwand oberhalb der Stichkanäle.

Die nichtlinearen Berechnungen bestätigen damit die Aussage der linear-elastischen Berechnung und belegen ebenfalls, dass die geforderte Sicherheit nicht gegeben ist.

7 Zusammenfassung

Die an der Alten Schleuse Kiel-Holtenau durchgeführten Untersuchungen ergeben ein in sich schlüssiges Bild vom Zustand des Bauwerks.

Akut standsicherheitsgefährdet sind dabei die identisch ausgebildeten Seitenmauern der beiden Kammern. Die Mittelmauer ist deutlich robuster.

Das Bauwerk ist an heutigen Normen gemessen von Beginn an nicht tragfähig gewesen. Die Defizite sind für die Basis-Einwirkungen nicht so groß, dass das Bauwerk versagt hätte, was mit genaueren, nichtlinearen Berechnungen belegt werden konnte. Aber es muss davon ausgegangen werden, dass die geforderten Sicherheiten zu keiner Zeit eingehalten waren.

Grund für die dennoch 120jährige Standzeit ist unter anderem die sehr sorgfältige Ausführung und die Auswahl sehr guter Baustoffe. Die Materialuntersuchungen belegen auch heute noch sehr hohe Materialkennwerte außerhalb der geschädigten Bereiche.

Zusätzlich aufgetretene Einwirkungen während der Nutzung durch hohe Verkehrslasten, Eis und Schiffsverkehr haben aber zu Überbeanspruchungen geführt, die sich in unterschiedlichen Schädigungen zeigen.

Primär fallen große, kammerparallele Risse und Klüfte auf, die wahrscheinlich temperaturinduziert entstanden sind und infolge Durchströmung und Frostbeanspruchung insbesondere in der als Trockendock genutzten Südkammer zu den heute erkennbaren Schädigungen geführt haben.

Darüber hinaus hat die Überbeanspruchung des Querschnitts zu einem Riss im erdseitigen First des Längslaufs geführt, der in der Südkammer vorgefunden wurde. Des Weiteren führt die Überschreitung der Schubtragfähigkeit zu einem Versatz in der kammerseitigen Längslaufwand, der sowohl in der Kammer als auch im Längslauf sichtbar ist. In [S2] wird von gleichartigen Schäden in der Seitenmauer der Nordkammer berichtet.

Die archivierten Unterlagen belegen, dass die auf die Überbeanspruchung hinweisenden Schäden bereits vor ca. 40 Jahren vorhanden waren und auch als solche erkannt wurden.

Tragfähigkeitsreserven lassen sich auch mit verfeinerten Methoden nicht mobilisieren, wie nichtlineare Vergleichsberechnungen belegen. Diese Erkenntnis belegen auch die Schäden am Bauwerk, die zeigen, dass lokales Versagen bereits stattgefunden hat.

Die Gesamtbewertung der Erkenntnisse führt zu dem Ergebnis, dass beide Schleusenkammern erhebliche Sicherheitsdefizite aufweisen, die einem Weiterbetrieb der

Schleuse widersprechen. Wir empfehlen, die Alte Schleusenanlage Kiel-Holtenau außer Betrieb zu nehmen und Sicherungsmaßnahmen vorzusehen, die eine Gefährdung für Menschen auf dem Gelände der Schleusenanlage ausschließen.

Aufgrund der gegebenen Baugleichheit der Neuen Schleusen Kiel-Holtenau und der Alten Schleusen Brunsbüttel empfehlen wir dringend, auch diese beiden Bauwerke einer ähnlichen Begutachtung zu unterziehen.

Bundesanstalt für Wasserbau
Karlsruhe, 16. April 2014

Im Auftrag Bearbeiter

Dipl.-Ing. Ehmann Dr.-Ing. Bödefeld Kiesel M.Sc.

8 Literatur

Alfes, C., Rast, R. (2012): DGfM-Information zur Einführung des Eurocode 6 für den Mauerwerksbau. In: Informationen der Deutschen Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau e.V., Berlin.

Anonym (1893): Der Nord-Ostsee-Kanal. Die Ostseeschleusen zu Holtenau. Begleitschrift zu dem auf der Weltausstellung in Chicago ausgestellten Modell der Schleusen. Berlin.

BAW (1981): Prüfbericht über Untersuchungen von Bohrkernen aus der Südkammer der Alten Schleusen Kiel-Holtenau. 12.06.1981. Gutachten-Auftrags-Nr. 814 185, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

BAW (1988): Südmauer der alten Schiffsschleuse Kiel-Holtenau, Baugrundgutachten über die Hinterfüllung. 23.12.1988. Gutachten-Auftrags-Nr. 853375, Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg.

BAW (1990a): Bericht über die TV-Bohrlochinspektion in den Kammerwänden der Alten Schleusen Kiel-Holtenau. 20.04.1990. Gutachten-Auftrags-Nr. 8916160, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

BAW (1990b): Alte Schleuse Kiel-Holtenau, Baugrundgutachten über die Hinterfüllung der Kammerwände. 03.05.1990. Gutachten-Auftrags-Nr. 853375, Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg.

BAW (1990c): Alte Schleusen in Kiel-Holtenau, Bericht über Bauwerksmessungen während einer Probeabsenkung inkl. Anlagen zum Bericht und Fotos zum Bericht. 16.10.1990. Gutachten-Auftrags-Nr. 953407, Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg.

BAW (1990d): Gutachten über Randbedingungen zur Standsicherheit der Alten Schleusen Kiel-Holtenau. 30.11.1990. Gutachten-Auftrags-Nr. 8916160, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

BAW (1992): Teilgutachten Materialprüfungen Alte Schleusen Kiel-Holtenau Teil A+B. 01.12.1992. Gutachten-Auftrags-Nr. 8916160, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

BAW (1993): Ergänzung zum Teilgutachten Materialprüfungen Alte Schleusen Kiel-Holtenau. 08.11.1993. Gutachten-Auftrags-Nr. 8916160, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

BAW (2011): Untersuchungen an Beton- und Mauerwerksbohrkernen (Materialkennwerte). 12.12.2011. Gutachten-Auftrags-Nr. A39510310347, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

DIBt (2012): Erläuterungen zur Anwendung des Eurocodes 6: „Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten“ vor der Bekanntmachung als Technische Baubestimmung. In: DIBt-Newsletter 3/2012, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin.

DIN 105-1:1989-08. Mauerziegel - Vollziegel und Hochlochziegel. Normenausschuss Bauwesen im DIN. Beuth Verlag, Berlin.

DIN 105-100:2012-01. Mauerziegel, Teil 100: Mauerziegel mit besonderen Eigenschaften. Normenausschuss Bauwesen im DIN. Beuth Verlag, Berlin.

DIN 1053-1:1990-02. Mauerwerk, Teil 1: Berechnung und Ausführung. Normenausschuss Bauwesen im DIN. Beuth Verlag, Berlin.

DIN 1053-1:1996-11. Mauerwerk, Teil 1: Berechnung und Ausführung. Normenausschuss Bauwesen im DIN. Beuth Verlag, Berlin.

DIN 1053-2:1989-07. Mauerwerk, Teil 2: Mauerwerksfestigkeitsklassen aufgrund von Eignungsprüfungen. Normenausschuss Bauwesen im DIN. Beuth Verlag, Berlin.

DIN 1053-2:1996-11. Mauerwerk, Teil 2: Mauerwerksfestigkeitsklassen aufgrund von Eignungsprüfungen. Normenausschuss Bauwesen im DIN. Beuth Verlag, Berlin.

DIN 1053-100:2007-09. Mauerwerk - Teil 100: Berechnung auf der Grundlage des semiprobalistischen Sicherheitskonzeptes. Normenausschuss Bauwesen im DIN. Beuth Verlag, Berlin.

DIN 19702:1966-10. Massivbauwerke im Wasserbau – Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit. Fachnormenausschuss Wasserwesen im DIN. Beuth Verlag, Berlin.

DIN 19702:1992-10. Massivbauwerke im Wasserbau – Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit. Normenausschuss Wasserwesen im DIN. Beuth Verlag, Berlin.

DIN 19702:2013-02. Massivbauwerke im Wasserbau – Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit. Normenausschuss Wasserwesen im DIN. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 771-1:2011-07. Festlegungen für Mauersteine, Teil 1: Mauerziegel. Normenausschuss Bauwesen im DIN. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 1052-3:2007-07. Prüfverfahren für Mauerwerk, Teil 3: Bestimmung der Anfangsscherfestigkeit (Haftscherfestigkeit). Normenausschuss Bauwesen im DIN. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 1990:2010-12. Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung. Normenausschuss Bauwesen im DIN. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 1990/NA:2010-12. Nationaler Anhang - Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung. Normenausschuss Bauwesen im DIN. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 1990NA/A1:2012-08. Nationaler Anhang - Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung, Änderung 1. Normenausschuss Bauwesen im DIN. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 1996-1-1:2013-02. Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk. Normenausschuss Bauwesen im DIN. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 1996-1-1/NA:2012-05. Nationaler Anhang - Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk. Normenausschuss Bauwesen im DIN. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 1996-1-1/NA/A1:2014-03. Nationaler Anhang - Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk, Änderung A1. Normenausschuss Bauwesen im DIN. Beuth Verlag, Berlin.

DIN V 105-1:2002-06: Mauerziegel, Teil 1: Vollziegel und Hochlochziegel der Rohdichteklassen ≥ 1,2. Normenausschuss Bauwesen im DIN. Beuth Verlag, Berlin, 2002.Egermann, R. (1992): Zur nachträglichen Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Mauerziegeln. In: Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke. Sonderforschungsbereich 315, Universität Karlsruhe, Jahrbuch 1990. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin.

Dynardo (2014): Nichtlineare FE-Analysen zur Überprüfung der Standsicherheit der Alten Schleuse Kiel-Holtenau. Technischer Bericht. Weimar, unveröffentlicht.

Egermann, R. (2014): Alte Schleuse Kiel-Holtenau, Untersuchungen zur Schaffung von Grundlagen für den Standsicherheitsnachweis der südlichen Schleusenkammer. Karlsruhe, unveröffentlicht.

Fülscher, J. (1896): Der Bau des Kaiser Wilhelm-Canals. In: Zeitschrift für Bauwesen, S. 547-572.

Graubner, C.-A. et al. (2005): Festigkeitseigenschaften von Mauerwerk. In: Mauerwerk-Kalender 2005. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, Berlin.

Hayßen, K. (1926): Die Verwendung der alten Holtenauer Südschleuse als Trockendock. In: Zentralblatt der Bauverwaltung, S. 64-66.

Heat (2000): Handbuch. FEMMASSE B.V., CB Geldermalsen, Niederlande.

Jäger, W., Marzahn, G. (2010): Mauerwerk: Bemessung nach DIN 1053-100. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, Berlin.

Lieckfeldt, H. (1898): Die Standsicherheit von Staumauern mit offenen Lagerfugen. In: Zentralblatt der Bauverwaltung, S. 105-111.

Mann, W., Müller, H. (1985): Schubtragfähigkeit von gemauerten Wänden und Voraussetzungen für das Entfallen des Windnachweises. In: Mauerwerk-Kalender 1985. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, Berlin.

Natke, H.G. (1979): Stellungnahme zu Schallminderungsmaßnahmen bei Reparatur- bzw. Instandsetzungsarbeiten von Schleusentoren. Curt-Risch-Institut für Schwingungs- und Messtechnik, Universität Hannover. 03.12.1979. Hannover, unveröffentlicht.

Patitz, G. (2013): Kleine Schleusen Kiel-Holtenau, Erkundung der Kammerwände mit Bauradar. 16.07. und 17.10.2013. Karlsruhe, unveröffentlicht.

Schlegel, R. (2004): Numerische Berechnung von Mauerwerkstrukturen in homogenen und diskreten Modellierungsstrategien. Dissertation an der Bauhaus-Universität Weimar.

Schubert, P. (1989): Eigenschaftswerte von Mauerwerk, Mauersteinen und Mauermörtel. In: Mauerwerk-Kalender 1989. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, Berlin.

Schubert, P. (1995): Beurteilung der Druckfestigkeit von ausgeführtem Mauerwerk aus künstlichen Steinen und Natursteinen. In: Mauerwerk-Kalender 1995. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, Berlin.

Sofistik (2012): Handbuch. SOFiSTiK AG, Oberschleißheim.

Stauder, F. et al. (2011): Bestimmung der charakteristischen Betonfestigkeiten in Bestandstragwerken. Anwendungsgrenzen von DIN EN 13791. In: Beton- und Stahlbetonbau 106 (2011), Heft 12, S. 804-813. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, Berlin.

VV-WSV 2101 (2010): Verwaltungsvorschrift der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes 2101: Bauwerksinspektion. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.

WaStrG (1968): Bundeswasserstraßengesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. Mai 2007 (BGBl. I S. 962; 2008 I S.1980), das durch Artikel 4 Absatz 125 des Gesetzes vom 7. August 2013 (BGBl. I S. 3154) geändert worden ist.

WSD Kiel (1974): Bauarbeiten an den Alten Schleusen in Kiel-Holtenau. In: Nord-Ostsee-Kanal (NOK-Heft), Nr. 1/2, S.14-22.

WSD Kiel (1975): Grundinstandsetzung der Alten Schleusen Kiel-Holtenau. In: Nord-Ostsee-Kanal (NOK-Heft), Nr. 1/2, S.19-27.