

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Abratis, Joachim; Frentzel-Schirmacher, Anka; Pohl, Martin
Ein Blick auf die Herausforderungen beim Bau der 5. Schleusenkammer in Brunsbüttel

Bautechnik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/110504>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Abratis, Joachim; Frentzel-Schirmacher, Anka; Pohl, Martin (2022): Ein Blick auf die Herausforderungen beim Bau der 5. Schleusenkammer in Brunsbüttel. In: Bautechnik 99 (5). S. 377-383. <https://doi.org/10.1002/bate.202200023>.

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.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

Ein Blick auf die Herausforderungen beim Bau der 5. Schleusenkammer in Brunsbüttel

Der Neubau der 5. Schleusenkammer in Brunsbüttel ist die derzeit größte Wasserbaustelle Europas und erforderlich, um nachfolgend die bestehenden großen Schleusenkammern instand setzen zu können. Eine Nutzen-Kosten-Analyse ergab den höchsten Nutzwert für den Neubau zwischen den bestehenden großen und kleinen Schleusen, d. h. auf der Schleuseninsel. Durch die Insellage der Baustelle ergeben sich besondere Anforderungen an den Baubetrieb. Generell muss eine Vielzahl von Gewerken koordiniert werden, die u. a. für die Herstellung der tiefen Baugruben, der beton- und stahlbautechnischen Konstruktion der Häupter, der Kammer für seegängige Schiffe und der Vorhäfen erforderlich sind. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Baustelle an der Elbmündung liegt und somit auf Sturmfluten vorbereitet sein muss. Auf diese besonderen Randbedingungen der Baumaßnahme und auf ausgewählte Bauverfahren wird beispielhaft eingegangen. Ein besonderes Augenmerk des Beitrags liegt zudem auf den umfangreichen betontechnologischen Betrachtungen zur Erzielung dauerhafter Massivbaustrukturen. Bei der Entwicklung der Betonrezepturen waren neben der Minimierung von Rissbreiten in massigen Bauteilen Einwirkungen wie Frost- und Chloridangriff zu berücksichtigen. Die zeitweise eingeschränkte Verfügbarkeit von Flugasche gestaltete diese Aufgabe noch komplexer. Zur weiteren Verbesserung der Dauerhaftigkeit wurden in besonders exponierten Bauwerksbereichen wasserabführende Schalungsbahnen eingesetzt.

Stichworte Schleuse; Wasserbau; Baubetrieb; Bauverfahren; Dauerhaftigkeit; Massivbau; Betonrezeptur; Schalung

1 Veranlassung

Der Nord-Ostsee-Kanal (NOK) durchquert auf knapp 100 km Länge Deutschlands nördlichstes Bundesland und verbindet die Nordsee mit der Ostsee für seegängige Schiffe. Der NOK gilt als die meistbefahrene künstliche Seewasserstraße der Welt. Die Wasserstandsschwankungen zwischen dem NOK sowie der Nordsee (Elbe) bzw. der Ostsee (Kieler Förde) werden durch Schleusenanlagen in Brunsbüttel und Kiel-Holtenau für die Schifffahrt ausgeglichen. An beiden Standorten bestehen die Schleusenanlagen aus einer kleinen Doppelschleuse und einer großen Doppelschleuse. Der NOK und die kleinen Schleusen wurden im Jahr 1895 nach acht Jahren Bauzeit in Betrieb genommen. Der erste Ausbau des NOK erfolgte bereits von 1907 bis 1914. In diesem Zuge wurden auch die großen Schleusen errichtet. Die Schleusen sind seitdem durchgehend in Betrieb.

A look at the challenges of building the 5th lock chamber in Brunsbüttel

The new construction of the 5th lock chamber in Brunsbüttel is currently the largest hydraulic construction site in Europe and is necessary in order to be able to subsequently repair the existing large lock chambers. A benefit-cost analysis showed the highest benefit value for the new construction between the existing large and small locks, i. e. on the lock island. The location of the construction site results in special requirements for construction operations. In general, a large number of crafts have to be coordinated, which are necessary e. g. for the concrete and steel construction of the heads, the chamber for seagoing vessels and the outer harbours. Furthermore, it has to be taken into account, that the construction site is located at the estuary of the Elbe and thus has to be prepared for storm surges. These special boundary conditions of the construction project and selected construction methods are discussed by way of example. A special focus of the article is also on the extensive concrete technology considerations for achieving durable concrete structures. In addition to minimising crack widths in massive concrete elements, other aspects such as resistance against frost and chloride attack had to be considered for developing the concrete composition. The temporarily limited availability of fly ash made this task even more complex. In order to further improve durability, controlled permeability formwork liners were used in parts of the structure with sever exposure.

Keywords lock; hydraulic construction; construction management; construction method; durability; concrete composition; formwork

Die kleinen Schleusen in Brunsbüttel wurden bereits in den 1980er-Jahren saniert. Die großen Schleusen bedürfen nach über 100 Jahren Nutzungszeit ebenfalls einer Grundinstandsetzung des Massivbaus, des Stahlwasserbaus sowie der maschinen- und elektrotechnischen Anlagen zur Aufrechterhaltung der Verkehrs- und Betriebssicherheit.

Aufgrund der Art der erforderlichen Instandsetzungsarbeiten ergäben sich zwangsläufige Sperrzeiten für die Schifffahrt, die als nicht tolerabel beurteilt wurden. Um die Schleusenverfügbarkeit nicht einzuschränken, ist daher der Bau einer weiteren großen Schleusenkammer, der sogenannten 5. Kammer, erforderlich, sodass der Schifffahrt stets zwei große Schleusenkammern zur Verfügung stehen. Für die Lage der 5. Kammer wurden verschiedene Varianten untersucht. Als Kriterien wurden Aspekte wie Nautik, Grundstücksgrenzen und bestehen-



Bild 1 Baustelle der 5. Schleusenammer auf der Schleuseninsel (Jahr 2021)
Construction site of the 5th lock chamber between the existing locks (year 2021)

de Bebauung herangezogen. Die Nutzen-Kosten-Untersuchung ergab den höchsten Nutzwert bei einer Grundinstandsetzung der großen Schleuse mit einem vorgezogenen Neubau einer 5. Schleusenammer auf der Schleuseninsel, d.h. zwischen der großen Schleuse im Norden (Bild 1, rechts) und der kleinen Schleuse im Süden (Bild 1, links).

Auf die Besonderheiten zur Ausbildung der Rückverankerungen für die 5. Schleusenammer unter besonderer Berücksichtigung der GW-Verhältnisse und der empfindlichen Nachbarbebauung wurde in [1, 2] bereits eingegangen.

2 Logistik und Bauphasen

Weil die Wahl des Standorts der 5. Schleusenammer von Aspekten wie Nautik, verfügbare Flächen im Eigentum des Bundes, Minimierung der Auswirkungen auf Dritte sowie das Ziel einer „kompakten“, effizienten Einrichtung für den Betrieb bestimmt war, mussten Herausforderungen für die bautechnische phasenweise Umsetzung sowie die Logistik der Baustelle in Kauf genommen und gelöst werden.

2.1 Bauphasen, Baustelle im Tidebereich, Sturmfluten

Die Schleusenanlage in Brunsbüttel durchbricht die Landesdeichlinie. Der normale Tidenhub beträgt rund 3 m und pendelt um den Kanalwasserstand, der bei 0 m NHN gehalten wird. Bei Springtiden und insbesondere Sturmfluten erreichen die Wasserstände bis zu +5,40 m NHN. Die Baustelle liegt genau in diesem Einflussbereich. Das Außen- und das Binnenhaupt der im Bau befindlichen 5. Schleusenammer sind mit ihrer Gesamthöhe von +7,60 m NHN für den Sturmflutfall mit Wellenauflauf (und einem Klimazuschlag) ausgelegt. Dabei ist insbesondere die erforderliche Baugrube am Außenhaupt für den Sturmflutfall auszulegen. Abminderungen für die Sommerhalbjahre mit einem deutlich verminderten Sturmflutrisiko sind berücksichtigungsfähig und erlauben Baupha-

sen, in denen Bereiche der Baugruben längerfristig geöffnet bzw. zurückgebaut werden, sodass sich massivbauliche Anschlüsse und Verbindungen herstellen lassen.

Die Herstellung im Tidebereich mit entsprechend direkt beeinflussten und nachlaufenden Grundwasserständen stellt gerade an die Sicherung der Baugruben gegen Auftrieb und hydraulischen Grundbruch besondere Anforderungen. Im Zuge dessen werden die Baugruben zunächst so weit im Trockenen ausgehoben und mit innenliegenden Aussteifungen versehen, wie es die ungesicherte Sohle zulässt, um anschließend den weiteren Aushub unter Wasserauflast fortzusetzen.

2.2 Inselanleger Baustoffe elbseitig

Logistisch ist das Bauen auf einer Insel eine besondere Herausforderung. Alle Materialien, Arbeitskräfte und Geräte müssen über den Wasserweg zur Baustelle gebracht werden. Elbseitig wurden deshalb gerade für die Anlieferung der Baumaterialien, Spundwände, Gesteinskörnungen für die Betonherstellung und den Abtransport der aus den Baugruben und anderen Bereichen geförderten Böden zwei Anleger eingerichtet. Bei den Massenbetonagen (insbesondere den Unterwasserbeton- und Konstruktionssohlen der Schleusenmäpfer mit einzubauenden Massen von rund 3000 m³ je Betonage) sind die Lagerkapazitäten im Bereich des Betonmischwerks aufgrund der eingeschränkten Flächenverfügbarkeit nicht ausreichend, sodass betonherstellungsbegleitend und kontinuierlich die Gesteinskörnung per Binnenschiff nachgeführt werden muss.

2.3 Betonmischwerk auf der Baustelle Schleuseninsel

Um eine kontinuierliche Versorgung der Baustelle mit Beton zu erreichen und dabei auch die zulässigen Transportzeiten einzuhalten, wurde direkt auf der Schleusenbaustelle ein Doppel-Betonmischwerk eingerichtet (Bild 2). Dieses Mischwerk ist in seinen Kapazitäten so ausgerichtet, dass es gerade auch Großbetonagen beliefern kann, d.h., dass dieses redundant ausgelegt worden ist und demnach im Grunde sogar zwei Betonmischwerke vorhanden sind.

2.4 Inselanleger Fähre kanalseitig, Rettungsweg

Die Arbeitskräfte, Geräte und alle Anlieferungen auf dem direkten, arbeitstäglichen Antransport über die Straße erreichen die Baustelle über einen kanalseitigen Fähranleger (Bild 3). Dieser Anleger wurde zunächst provisorisch eingerichtet. Mittlerweile wurde dieser durch einen endgültigen, dann auch für den späteren Betrieb und die Unterhaltung der Schleusenanlage nutzbaren Anleger im Bereich des Binnenhaupts ersetzt. Mit einem regelmäßigen (fahrplangebundenen) Pendelverkehr einer Klappenfähre zwischen der landseitigen Baustelleneinrichtungs-



Bild 2 Betonmischwerk und elbseitiger Anleger für Baustofftransporte
Concrete mixing plant and feeder

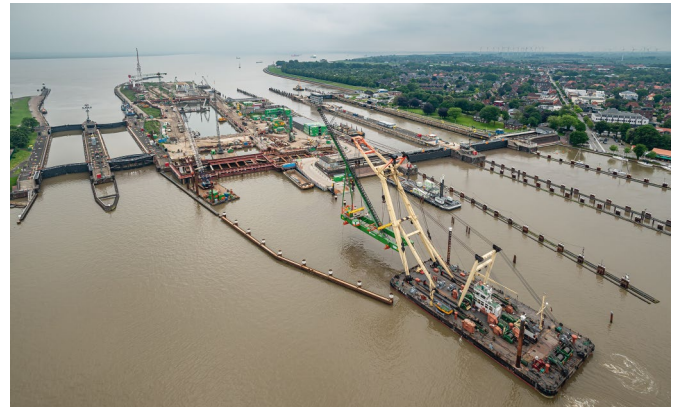


Bild 4 Anlieferung mittels Schwimmkran Enak
Transport via floating crane

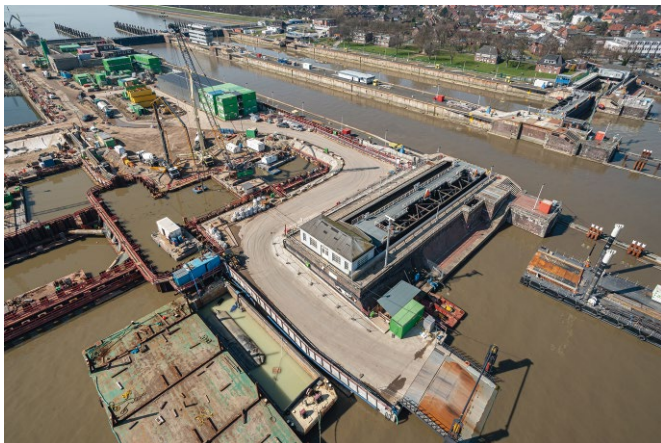


Bild 3 Fähranleger zwischen dem Binnenhaupt der 5. Schleusenammer und der großen Südschleuse
Ferry dock between the inland heads of the locks

fläche und der Schleuseninsel wird die Verbindung sichergestellt. Dabei dient dieser Fähranleger auch als Rettungsweg. Hier kommt die unmittelbare Nähe zu den Fähranlegern zur Kreuzung des Kanals in Brunsbüttel zugute. Die dort im Einsatz befindlichen sogenannten Spitzfähren können den Fähranleger der Schleuseninsel erreichen und bedienen, sodass in jedem Fall sehr kurze, direkte Verbindungen für Rettungskräfte sichergestellt sind.

2.5 Besondere Bauphasen

Besondere phasen- und bereichsbezogene Gerätekonstellationen lassen sich vor allem im Bereich der Binnenhauptbaugrube mittels Schwimmkran anliefern und einrichten. Für die Herstellung der baugrubenaussteifenden Schrägpfähle wurde beispielsweise die Mäklereinheit für die schweren Ramppfähle (Rohr D 610 mm, $d = 16$ mm, $l = 46$ m) direkt mit der vorbereiteten, auf Schienen verfahrbaren Arbeitsplattform eingehoben (Bild 4).

Aufgrund der Größe der Schleusenammer (Breite 45 m, Länge 360 m) ist eine Herstellung der Rückverankerung der Schleusenammersohle über schienengelagerte und verfahrbare Arbeitsplattformen nicht möglich. In diesem

Fall kommen schwimmende Arbeitsplattformen (aufgebaut aus Pontonsegmenten) zum Einsatz. Auch die Queerung der inzwischen nahezu vollständig ausgebaggerten Schleusenammer erfolgt mittels einer schwerlastgängigen Pontonbrücke.

Nach dem weitestmöglichen Trockenaushub wurde die Schleusenammer auf einen Wasserstand bis +3,10 m NHN geflutet und die Arbeiten mit dem Unterwasseraushub fortgesetzt. Hierbei müssen die unterschiedlichen Bauphasen in den Bauteilen des Außenhauts, der Schleusenammer und des Binnenhauts immer ganzheitlich betrachtet werden. Eine Entkopplung ist nicht möglich, da die Baugrubenwände der Häupter gleichzeitig die Wandung der Schleusenammer darstellen.

Daraus folgt ein insgesamt komplexer Bauphasen- und Terminplan, der nicht nur der ausführenden ARGE (Wayss&Freytag Ingenieurbau AG, BAM Infra B.V.), sondern auch der ausführenden Ingenieurgesellschaft (grbv mit Krebs+Kiefer), dem Prüflingenieur (Dipl.-Ing. Duensing) und der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung, vertreten durch das Wasserstraßen Neubaupamt NOK, gemeinsam mit der Bundesanstalt für Wasserbau gute Umsicht und Abstimmung abverlangte. Gleichzeitig erwarten die Nutzer des NOK und das betriebsführende Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt NOK eine beeinträchtigungsfreie Betriebsmöglichkeit der vorhandenen Schleusen.

Auf den schwimmenden Arbeitsplattformen sind zur Herstellung der Rückverankerungen mittels Düsenstrahlverfahren (DSV) je zwei Bohreinheiten angeordnet (Bild 5). Die Herstellung der insgesamt rund 1600 Pfähle, in einem Raster von rund 3,20 m mit Pfahllängen von rund 15 m bei einem rund 4 m langen Düsenstrahlkörper, erfolgt werktäglich rund um die Uhr, um die bauzeitlichen Vorgaben insgesamt sicherzustellen. Der Suspensionsrückfluss wird zum Teil auf der Sohle in Kombination mit der Ausgleichskiesschicht belassen und so für die spätere, weitestgehend 1,50 m starke UW-Betonsohle genutzt. Der überwiegende Teil des Rückflusses wird in Erdbecken auf der Schleuseninsel gesammelt, zwischengelagert und nach ausreichender Erhärtung entsorgt.



Bild 5 Pontoneinheit mit zwei Bohrgeräten und Mobilkran zur Andienung der Stahlglieder
Pontoon unit with two drilling rigs and mobile crane

2.6 Bodenaushub, -transport und Einlagerung

Der gesamte aus den Baugruben gewonnene Boden und auch die nass zu baggernden Bereiche insbesondere zur Anpassung des Vorhafens werden binnenseitig auf einem Bodenlager eingebaut. Dieses Bodenlager liegt bei Kkm 13, der Antransport erfolgt in der Regel durch Binnenschiffe, deren Befüllung entweder direkt vom Nassbaggergerät oder aber an den elbseitigen Anlegern erfolgt. Insgesamt wird für den Neubau Boden in einer Größenordnung von rund 1,6 Mio m³ aus- und am Bodenlager wieder eingebaut. Aufgrund der ungünstigen Baugrundbedingungen am Einlagerungsort ist die Aufnahmekapazität ein wichtiger limitierender Faktor, der in die Bauablaufkoordination mit einbezogen werden muss.

Neben der Berücksichtigung angrenzender und weiter in Betrieb zu haltender Anlagen und der Verfügbarkeit und Zugänglichkeit ausreichender Flächen muss zusammen mit der jeweiligen Eignung ein notwendiger und im wahrsten Sinne tragfähiger Kompromiss gefunden werden, um derartige Großprojekte heute noch genehmigungsfähig zu machen.

3 Betontechnologische Herausforderungen

3.1 Betonsorten und ihre Anforderungen

Die Schleusanlage Brunsbüttel liegt als Tor des Nord-Ostsee-Kanals im Brackwasserbereich der Elbe. Sie wird elbeseitig durch stark wechselnde Salzfrachten belastet und ist einer ständigen erhöhten Belastung durch Alkalien von außen ausgesetzt. Aufgrund ihrer Kubatur sind die wesentlichen Bauwerksteile der 5. Schleusenammer als massige Bauteile einzustufen und unterliegen somit Einwirkungen aus frühem und spätem Zwang. Die Bereiche ab der Wasserwechselzone sowie die Planiebereiche unterliegen zusätzlich einem erhöhten Frost-Tausalzangriff. Bild 6 zeigt die prinzipiellen Querschnitte des Massivbaus mit den eingesetzten Betonsorten.

Zwei besondere Herausforderungen bei der Rezepturentwicklung stellten die kombinierte Anforderung der Expositionsklassen XS3 und XF4 nach [3] sowie die eingeschränkte Verfügbarkeit von Flugasche dar.

3.2 Auswirkungen durch die eingeschränkte Verfügbarkeit von Flugasche

Bereits frühzeitig zeichnete sich eine zumindest temporär eingeschränkte Verfügbarkeit von Flugasche ab. Zur Begegnung des Problems werden drei Lösungswege verfolgt: 1) Vorhalten von Ersatzrezepturen ohne Verwendung von Flugasche, 2) Vorhalten von Rezepturen mit Ersatzflugaschen und 3) Erarbeitung eines bauteilbezogenen Rankings im Hinblick auf die Notwendigkeit des Einsatzes von Flugasche in Abhängigkeit von der jeweiligen Exposition. Rezepturen unter Verwendung von CEM I, CEM II und CEM III/A sind gemäß Bauvertrag und ZTV-W LB 215 [4] für den Einsatzbereich XS2, XS3 ohne Flugasche nicht zugelassen, da hiermit eine Nutzungsdauer von 100 Jahren nicht in jedem Fall zielsicher erreicht werden kann. Seitens des Auftraggebers wurde deshalb für bestimmte Bauteile die Möglichkeit eröffnet, Betonrezepturen ohne Flugasche für den Fall der Nichtverfügbarkeit auf Basis einer Lebensdauerbemessung gemäß BAWMerkblatt MDCC [5] zu entwickeln. Auf dieser Basis konnten zeitweise Bohrpfähle, Abschirmplatten der Schleusenammerwand sowie die Unterwasserbetonsole des Binnenhafens (Bild 7) mit Betonen ohne Flugasche erstellt werden.

In Tab. 1 sind drei wesentliche Rezepturen mit und ohne Flugasche gegenübergestellt.

Im Juli 2021 stellte das Kraftwerk Hamburg-Moorburg seinen Betrieb ein, womit die Hauptflugasche entfiel. Auf Basis von Lösungsweg 2 konnte rechtzeitig eine Umstellung auf eine Ersatzflugasche aus dem Kraftwerk Hamburg-Tiefstack erfolgen.

Parallel wurden die erforderlichen Flugaschemengen für diejenigen Bereiche abgeschätzt (Lösungsweg 3), in welchen auf den Einsatz von Flugasche nicht verzichtet werden kann, um hierfür ggf. erforderliche Mengen zu bevorzugen. Dies sind insbesondere Bereiche, die standsicherheitsrelevant sind und/oder bei einer Schädigung einen erhöhten Instandsetzungsaufwand bedingen, aber auch Bereiche, die im Schadensfall die Gebrauchstauglichkeit des Schleusenbauwerks einschränken, wie z. B. Zweitbetonbereiche und Planie.

3.3 Massenbeton für die Expositionsbereiche XS3, XF4

Ab einer Höhe von -2,5 m NHN ist das Bauwerk mit Beton der Expositionsklassen XS3, XF4 auszuführen (Bild 6). Sowohl im Bereich der Torkammern als auch im Bereich der Schleusenammer ist aufgrund der Bauwerksdicken Massenbeton erforderlich.

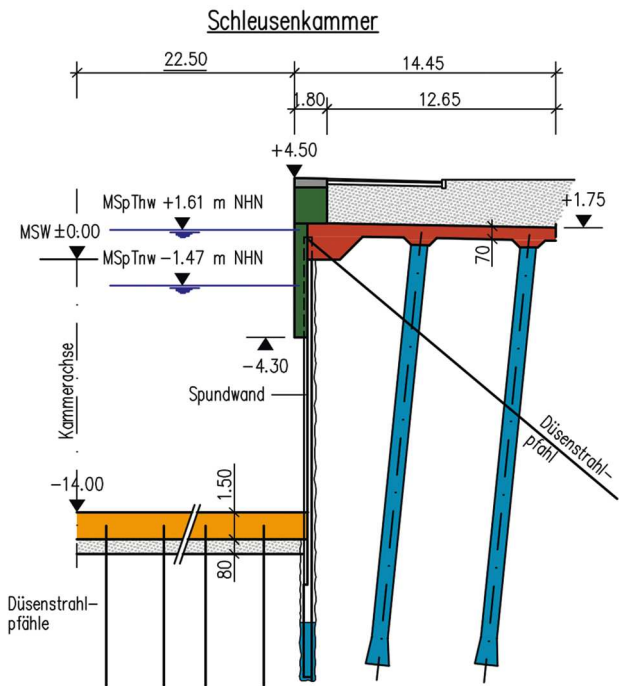
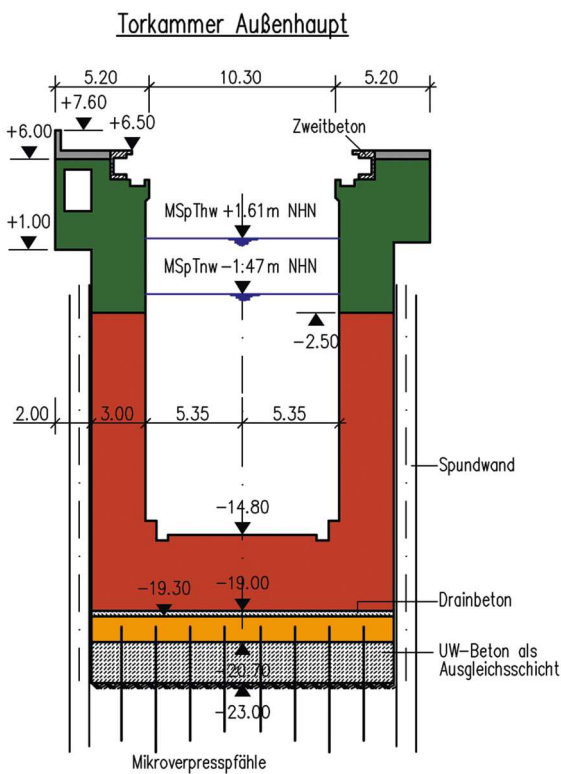


Bild 7 Unterwasserbetonsohle des Binnenhaupt
Underwater concrete base of the landward head construction



- Bohrpfaßbeton C35/45 XC2, XS3, XA2, WA
- Massenbeton C30/37 XC2, XS3, XA2, WA
- Massenbeton LP C30/37 (LP), XC4, XS3, XF4, XA2, XM1, WA
- UW-Beton C30/37 XC1, XS2, XA2, XM1, WA
- Beton C30/37 (LP), XC4, XD3, XS3, XF4, XA2, XM1, WA

Bild 6 Überblick über die Betonsorten in den maßgeblichen Massivbauwerkteilen
Overview of concrete types in relevant structural elements

Erste Versuche, einen Massenbeton zu entwerfen, der sowohl den geforderten Frost-Tausalz widerstand als auch einen ausreichenden Chlorideindringwiderstand aufweist, waren nicht zielführend. Deshalb wurden auf Basis der bis dahin gewonnenen Erkenntnisse die Risiken und Einflussfaktoren auf die Dauerhaftigkeit, die Auswirkungen auf die Gebrauchstauglichkeit sowie der erforderliche Instandhaltungsaufwand durch den Bauherrn unter Beratung der BAW abgewogen. Es wurde festgelegt, bei der Konzeption des Massenbetons die Anforderungen an den Chlorideindringwiderstand aufrechtzuerhalten und etwaige Defizite aus der Betonzusammensetzung im Hinblick auf den Frost-Tausalzwiderstand durch den Einsatz wasserabführender Schalungsbahnen zu kompensieren.

In einem gemeinsamen Abstimmungsprozess zwischen bauausführender Firma, dem Auftraggeber und der BAW wurden auf Basis der bis dahin gewonnenen Erkenntnisse, des Bauvertrags und der ZTV-W LB 215 [4] die Anforderungen an den Beton unter Berücksichtigung dieser Kompensationsmaßnahme erneut festgelegt. Der Nachweis der Wirksamkeit der wasserabführenden Schalungsbahn wurde durch ein gemeinsames Untersuchungsprogramm an Kleinbauteilen der bauausführenden ARGE und der BAW geführt. Vor dem Hintergrund der ggf. eingeschränkten Verfügbarkeit von Flugasche wurden die Versuche sowohl für die gewählte Rezeptur mit als auch für eine ohne Flugasche durchgeführt (Tab. 1 – Massenbeton C30/37 LP).

Das Untersuchungsprogramm umfasste die Untersuchung von Frisch- und Festbetoneigenschaften. Die zentralen Untersuchungen erfolgten an Kleinbauteilen mit Abmessungen von 50 cm × 50 cm × 80 cm (Bild 8), welche auf gegenüberliegenden Seiten mit wasserabführender Schalungsbahn und baustellenüblicher Schalung mit dem auf der Baustelle verwendeten Trennmittel ausgerüstet waren.

Durch die ARGE erfolgte die Beton- und Probekörperherstellung inklusive Standardfrisch- und Festbetonprü-

Tab. 1 Ausgewählte Rezepturen mit und ohne Flugasche und bisherige Einsatzbereiche
Selected concrete mixes with and without fly ash and their current applications

	Massenbeton C30/37 LP XC4, XS3, XD3, XF4, XA2, XM1, WA		Massenbeton C30/37 XC2, XS3, XA2, WA		Unterwasserbeton C30/37 XC1, XS2, XA2, XM1, WA	
	mit FA	ohne FA	mit FA	ohne FA	mit FA	ohne FA
	kg/m³					
CEM III/A 32,5 N-LH (na)	–	–	290	320	280	360
CEM III/A 42,5 N-LH (na)	305	325	–	–	–	–
Flugasche (FA)	35	–	90	–	165	–
Kalksteinmehl (KSM)	–	–	–	30	–	75
Wasser	160	162	163	161	172	180
Gesteinskörnung	1804	1826	1858	1881	1740	1787
Zusatzmittel	BV, FM, VZ, LP	BV, FM, VZ, LP	BV, FM, VZ	BV, FM, VZ, LP	BV, FM, VZ	BV, FM, VZ
LP-Gehalt	6,0 Vol.-%	6,0 Vol.-%	–	3,0 Vol.-%	–	–
Zusätzliche Randbedingungen	in Expositionsbereichen XF4 nur in Verbindung mit wasserabführender Schalungsbahn		–	LP zur Festigkeitsabsenkung	–	nur Winterbetonagen
Bisherige Einsatzbereiche	Außenhaupt	bisher nicht eingesetzt	Schleusenammerwand, Außenhaupt		Außenhaupt	Binnenhaupt



Bild 8 Betonage eines Kleinbauteils zum Nachweis der Wirksamkeit der wasserabführenden Schalungsbahn
Construction of a small element to verify the effectiveness of the controlled permeability formwork liners

fungen. Durch die BAW wurden Untersuchungen zur Frischbetonstabilität, zur Beeinflussung des Frost-Tausalz widerstands und des Chlorideindringwiderstands sowie zur Beeinflussung der Betonrandzone durchgeführt.

Für beide Betonsorten, mit und ohne Flugasche, wurde im Standardversuch nach BAW MDCC [5] ein ausreichender Chlorideindringwiderstand des ungerissenen Betons unter den vorgegebenen Randbedingungen nachgewiesen. Durch die Wirkung der wasserabführenden Schalungsbahn wird diesbezüglich eine zusätzliche Verbesserung erzielt.

Durch den Einsatz der wasserabführenden Schalungsbahnen konnte für beide untersuchten Betonsorten eine erhebliche Verbesserung des Abwitterungsverhaltens im CDF-Test [6] erzielt werden. Sie wird im Wesentlichen auf die Absenkung der kapillaren Wasseraufnahme ohne Frosteinwirkung zurückgeführt, welche eine Verringerung des Sättigungsgrads des Betons bei Einsetzen der Frost-Tau einwirkung bewirkt. Bei Untersuchungen der Betonrandzone am Beton ohne Flugasche wurde sowohl eine tendenzielle Absenkung des Gesamtporenvolumens als auch eine Verschiebung der Porenradienverteilung zu geringeren Porenradien beobachtet. Es ist davon auszugehen, dass durch die Verdichtung der Randzone nicht nur die kapillare Wasseraufnahme des Randbereichs herabge-



Bild 9 Beheiztes Schutzzelt zum Aufbringen der wasserabführenden Schalungsbahn
Heated protective tent for covering the controlled permeability formwork (CPF) liners



Bild 10 Bespannen der Schalung mit wasserabführender Schalungsbahn
Covering the CPF-liners

setzt, sondern auch der Carbonatisierung ein erhöhter Widerstand entgegengesetzt wird. Beide Prozesse wirken sich positiv auf den Frost-Tausalz widerstand eines Betons mit hüttensandhaltigem Zement aus.

Literatur

- [1] Pohl, M.; Nuber, T.; Abratis, J.; Peschken, G. (2020) *Düsenstrahlpfähle für die Schleuse Brunsbüttel unter besonderer Berücksichtigung der GW-Verhältnisse*. Bautechnik 97, H. 6, S. 427–432. <https://doi.org/10.1002/bate.202000036>
- [2] Pohl, M.; Abratis, J.; Peschken, G. (2021) *Ein technisches Unikat – Rückverankerung mit Düsenstrahlpfählen bei der 5. Schleusenkammer Brunsbüttel*. Digitale Vortragsveranstaltungen 2021 der Fachsektion Erd- und Grundbau (Vorträge der 36. Baugrundtagung) Teil 2. DGGT. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/108217>
- [3] DIN EN 1992 (2011) *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010. Berlin: Beuth.
- [4] ZTV-W LB 215 (2012) *Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau)*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.
- [5] BAWMerckblatt (2019) *Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC)*. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.
- [6] BAWMerckblatt (2012) *Frostprüfung von Beton (MFB)*. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.
- [7] Bundesanstalt für Wasserbau (2020) *Neubau der 5. Schleusenkammer Brunsbüttel, Nachweis der Wirksamkeit der wasserabführenden Schalungsbahn Zemdrain MD*. Gutachten B3951.03.11.10254. Karlsruhe.

Autorin und Autoren

Dipl.-Ing. Joachim Abratis
joachim.abratis@wsv.bund.de
Wasserstraßenneubauamt Nord-Ostsee-Kanal
Alte Zentrale 4
25541 Brunsbüttel

Dipl.-Ing. Anka Frentzel-Schirmacher
anka.frentzel-schirmacher@baw.de
Bundesanstalt für Wasserbau
Referat Baustoffe
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe



Bild 11 Fertiggestelltes Bauteil mit wasserabführender Schalungsbahn
Completed element by the use of CPF-liners

Im Ergebnis der Untersuchungen wurde der Einsatz der wasserabführenden Schalungsbahn Zemdrain MD durch die BAW für den projektspezifischen Einsatz an diesem Bauwerk unter der gegebenen Belastung empfohlen [7]. Die Bilder 9–11 dokumentieren die Ausführung auf der Baustelle. Alle bisher erstellten Betonierabschnitte zeigen eine hochwertige, dichte, poren- und lunkerarme Oberfläche, sodass bisher keine Instandsetzungsmaßnahmen zur Beseitigung größerer Lunker oder Verdichtungsfehler erforderlich waren.

Dr.-Ing. Martin Pohl (Korrespondenzautor)
martin.pohl@baw.de
Bundesanstalt für Wasserbau
Referat Geotechnik Nord
Wedeler Landstraße 157
22559 Hamburg

Zitieren Sie diesen Beitrag

Abratis, J.; Frentzel-Schirmacher, A.; Pohl, M. (2022) *Ein Blick auf die Herausforderungen beim Bau der 5. Schleusenkammer in Brunsbüttel*. Bautechnik 99, H. 5, S. 377–383. <https://doi.org/10.1002/bate.202200023>