

1. Hochbrücke Levensau: außergewöhnliche Uferwand - Konzeption, Bemessung, Bauabläufe und Details

Andreas Meisel¹, Johannes Albiker¹, Olaf Drude¹,
Andreas Rasmus², Malte Seppmann²

¹WKC Hamburg GmbH

²Wasserstraßen-Neubauamt Nord-Ostsee-Kanal, Kiel

Zusammenfassung: An „der“ Engstelle im Verlauf des Nord-Ostsee-Kanals wurde ein komplexes System aus interagierenden Bohrpfahlwänden und einer vorgesetzten gepanzerten Spundwand konzeptioniert. Die Bemessung des insgesamt 19 m hohen Geländesprungs erfolgte mit PLAXIS. Die Errichtung der Ufersicherung in der mit 1 : 1,28 geneigten, rechnerisch nicht standsicheren Bestandsböschung und unterhalb des Brückenwiderlagers stellt eine besondere Herausforderung dar.

1 Einführung

Der Nord-Ostsee-Kanal (NOK) wurde nach acht Jahren Bauzeit im Jahr 1895 fertiggestellt. Der Kanalquerschnitt war 67 m breit und 9 m tief. In dieser ersten Ausbaustufe wurden neben den Schleusenanlagen an beiden Enden unter anderem auch die Hochbrücke Levensau im Nordwesten von Kiel errichtet. Die Zweigelenk-Fachwerkbögen des Überbaus haben eine Spannweite von 163 m, die Durchfahrtslichte beträgt 42 m. Als Kämpfer dienen jeweils rund 20.000 t schwere, flach gegründete Widerlager aus Stampfbeton und Vollziegeln, siehe auch Abbildung 1.

Schon wenige Jahre nach der Fertigstellung des NOK wurde aufgrund immer größer werdender Marineschiffe ein Ausbau des Kanals erforderlich, im Zuge dessen die Breite unter der Levensauer Hochbrücke auf 101 m und die Tiefe auf 11 m vergrößert wurde [Webseite des WSV, 2022 [4]]. Infolge der Verbreiterung wurden die Neigung der ursprünglich unbefestigten Uferböschungen vor den Widerlagern von 1 : 1,5 auf 1 : 1,28 (rund 38°) erhöht. Am Fuß dieser seither steilen und gepflasterten Böschungen wurde jeweils eine Schwergewichts-Uferwand hergestellt.

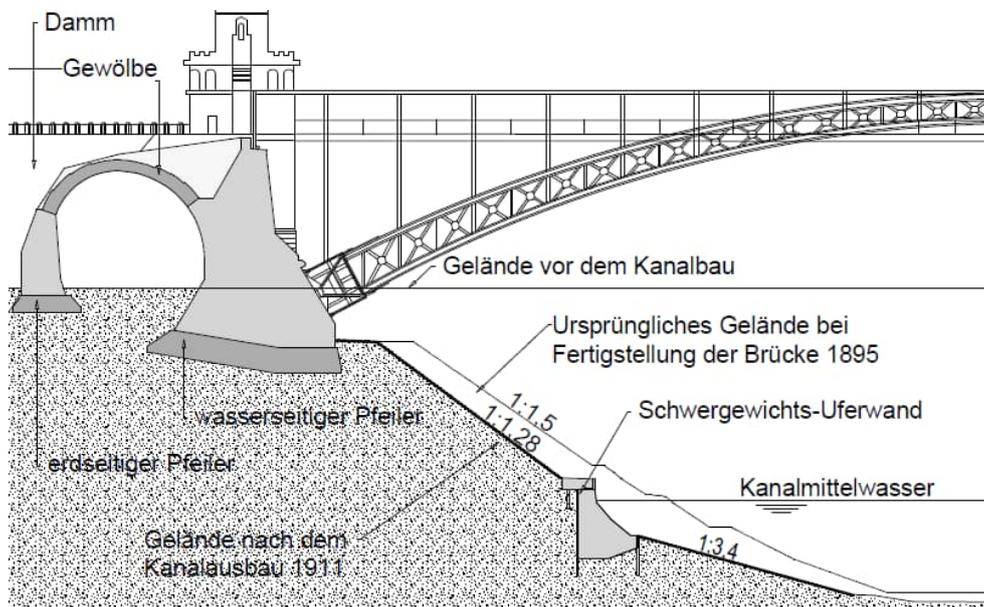


Abbildung 1: Südliches Widerlager und Uferbereich, Zustand 1911 bis 2021

Nach dem heutigem Sicherheitskonzept waren die steilen Uferböschungen rechnerisch nicht standsicher und unterlagen daher der „Beobachtungsmethode“, wurden also messtechnisch überwacht. Im Zuge der aktuell vorgesehenen erneuten Kanalverbreiterung ist eine weitere Verschiebung der südlichen Uferlinie um rund 6 m erforderlich. Gleichzeitig endet die rechnerische Lebensdauer des Überbaus aufgrund der Ermüdung des Schweißens in wenigen Jahren. 2009 erteilte daher der Bund dem Wasserstraßen-Neubauamt Nord-Ostsee-Kanal in Kiel-Holtenua den Auftrag, die bestehende Brücke durch einen Neubau zu ersetzen. Die Ingenieurgesellschaft 1. Hochbrücke Levensau (bestehend aus der federführenden WKC Hamburg GmbH und aus der Anwikar Consultants GmbH) plant seit 2012 den Ersatzneubau. Abbildung 2 zeigt die Zielvariante – eine Spreizbogenbrücke mit rund 186 m Spannweite. Die Planungen sehen vor, das Mittelteil des neuen Überbaus an einem anderen Ort zu fertigen und einzuschwimmen, sodass der Eisenbahn- und Schifffahrtsverkehr über weite Phasen der Bauausführung aufrecht erhalten bleiben kann.



Abbildung 2: Visualisierung der aktuellen Brückenplanung

In Spalten der Gewölbekammern der Bestandswiderlager überwintern jährlich tausende streng geschützte Fledermäuse, weshalb das südliche Bestandswiderlager über den Ersatzneubau hinaus erhalten werden muss. Die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Bestandswiderlagers muss auch nach dem Wegfall der Kämpferkräfte aus dem Bestandsüberbau gewährleistet sein. Vor diesem Hintergrund musste der rund 19 m hohe Geländesprung geplant werden.

2 Grundlagen, Konzeption, Baugrund und Bemessung

2.1 Planungsgrundlagen und Konzeption

Die zukünftige, südliche Ufersicherung und Böschung (siehe Abbildung 3) muss folgende Zielsetzungen erfüllen:

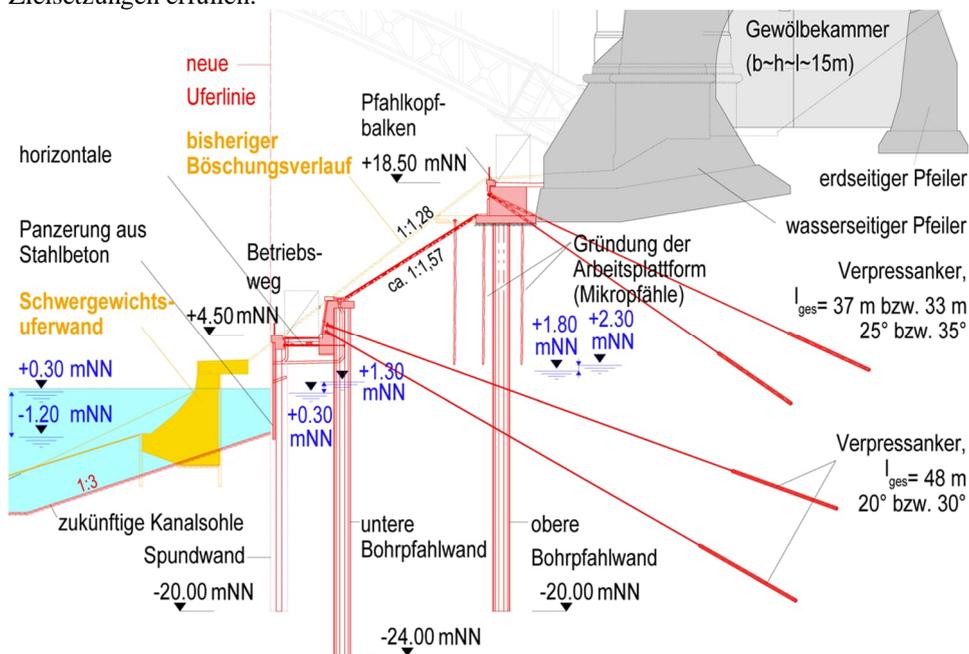


Abbildung 3: Längsschnitt durch das zukünftige südliche Kanalufer

- die neuerliche Kanalverbreiterung, daher sind zusätzliche stützende Bauwerke notwendig
- nach der aktuellen Normung standsichere, unbefestigte (begrünte) Böschung
- hochwertige Gestaltung
- dauerhafte und verformungsarme Sicherung des Bestandswiderlagers als Naturhabitat, trotz Wegfall der Kämpferkräfte aus dem bisherigen Überbau
- Vermeidung eines Grundwasseraufstaus: alle Bauteile sind hydraulisch durchlässig zu konstruieren (vgl. [Bundesanstalt für Wasserbau, 2015 [2]]).
- Robustheit gegen Schiffsanprall: die tragenden Bauteile werden soweit wie möglich von der Uferlinie entfernt angeordnet

- Minimierung des Aufwands für die Bauzustände
- Wiederherstellung der Betriebswege am Ufer und am Bestandswiderlager

Die Variantenstudien im Zuge der Vorplanung haben gezeigt, dass alle genannten Ziele für die Sicherung des Geländesprungs durch ein komplexes System aus drei hintereinandergeschalteten Verbauwänden und einer unbefestigten Böschung am besten zu erreichen sind. Unmittelbar vor dem Bestandswiderlager wird die „obere Bohrpfahlwand“ - bestehend aus Bohrpfählen mit 1,5 m Durchmesser im lichten Abstand von 0,75 m - angeordnet. Gemeinsam mit einem massiven Pfahlkopfbalken und einer gefächerten, vorgespannten Rückverankerung hat diese Wand vorwiegend die Aufgabe, das Bestandswiderlager verformungsarm in seiner Lage zu sichern. Für die Herstellung der oberen Bohrpfahlwand ist – aufgrund der derzeit rechnerisch nicht standsicheren Bestandsböschung – eine tiefgegründete Arbeitsplattform erforderlich.

Die „untere Bohrpfahlwand“ weist ebenfalls Bohrpfähle mit einem Durchmesser von 1,5 m und 0,75 m breiten Zwischenräumen auf. Die gefächerte Rückverankerung wird durch die Pfahlzwischenräume der rund 14 m weit entfernten oberen Bohrpfahlwand geführt. Die untere Bohrpfahlwand übernimmt sowohl die Erddrucklasten aus der Böschung und dem Geländesprung als auch die Kräfte aus den Horizontalankern der vorgesetzten Spundwand. Die Böschungsneigung wird von derzeit 38° auf 32,5° reduziert, sodass die Oberfläche selbst nicht zusätzlich gesichert werden muss.

Den wasserseitigen Uferabschluss bildet eine Spundwand des Profils AZ 44-700. Im Kopfbereich wird diese durch einen auf Schneidenlagerung bemessenen Stahlbetonholm eingefasst und durch horizontal verlaufende Rundstahlanker („Horizontalanker“) mit dem Kopfbalken der unteren Bohrpfahlwand gekoppelt. Um die Robustheit zu verbessern, wird die Spundwand zusätzlich mit hinterfüllten Stahlbetonfertigteilen wasserseitig gepanzert.

Die hydraulische Durchlässigkeit der beiden Bohrpfahlwände ist durch ihre aufgelöste Ausbildung sichergestellt (vgl. [Bundesanstalt für Wasserbau, 2013 [1]]). Im Bereich der Spundwand werden überschnittene Bohrungen hergestellt und mit Kies-Sand verfüllt. In diese hindernisfreie Trasse wird die Spundwand eingebracht, Stauwasser wird – in Kombination mit zusätzlichen Öffnungen – damit vermieden.

Der Betriebsweg wird zwischen der unteren Bohrpfahlwand und der Spundwand angeordnet. Im Falle einer Beschädigung der gepanzerten Spundwand dient er auch als Ufer-Verteidigungsweg.

2.2 Statische Bemessung der Konstruktion und Baugrundbedingungen

Aufgrund der Interaktionen der Wände erschien eine Bemessung auf analytischem Wege nicht sinnvoll durchführbar. Weiterhin ist durch die mehrfachen in der Vergangenheit liegenden und noch anstehenden Be- und Entlastungen des Baugrundes mit Steifigkeitsveränderungen zu rechnen. Daher wurde eine FE-Modellierung mit der Software PLAXIS unter Einbeziehung aller drei Wände vorgenommen. Um die mit den Be- und Entlastungsvorgängen einhergehenden Steifigkeitsveränderungen adäquat abzubilden, wurde das höherwertige Stoffmodell *Hardening Soil Small Strain* verwendet, und es wurden insgesamt 18 Bauphasen berücksichtigt, beginnend mit den in der Vergangenheit liegenden Phasen des ursprünglichen Geländeaufbaus, dem Kanalaushub und dem Brückenbau sowie der ersten Kanalverbreiterung, und weitergehend mit der Abbildung sämtlicher geplanter, relevanter Bauzwischenzustände bis hin zum Endzustand. Für eine detaillierte Darlegung der numerischen Bemessung und der Schritte zu deren Auswertung wird verwiesen auf [Meisel et al. 2023 [3]].

Der Bodenaufbau im Bereich des südlichen Kanalufers ist ausgeprägt heterogen, wenngleich aufgrund der eiszeitlichen Vorbelastung die bodenmechanischen Eigenschaften insgesamt als günstig einzustufen sind. Über weite Bereiche steht Sandboden an, welcher von insgesamt drei Lagen Geschiebemergel (schwach tonige Sand-Schluff-Gemische) durchzogen wird. In allen Homogenbereichen liegen vergleichsweise hohe Werte für die Scher- und Steifigkeitsparameter vor. Einen umfassenden Geotechnischen Bericht hat die [BAW (2013) [1]] erstellt. Für die numerische Bemessung wurde eigens ein Gutachten durch die IGB Ingenieurgesellschaft mbH erstellt, in welchem die Hardening-Soil-Parameter auf Basis der Auswertung von Triaxial- und Scherversuchen abgeleitet wurden.

3 Bauabläufe

Aufgrund der rechnerisch nicht standsicheren Böschung wurde zuerst die obere Bohrpfahlwand errichtet und rückverankert. Im Schutze dieser Wand wurde inzwischen die Böschung abgeflacht und mit dem Bau der unteren Bohrpfahlwand und Spundwand begonnen. Die Bauablaufplanung musste insbesondere die extrem beengten Platzverhältnisse und den von dauerhaften Schifffahrtshindernissen freizuhaltenen NOK berücksichtigen. Zeitaufwendige Bauarbeiten vom Kanal aus – z. B. die Herstellung von Pfählen - kamen daher nicht in Frage. Zum bestmöglichen Schutz der Bauschaffenden vor Schiffsanprall wurde zu Beginn der Arbeiten eine Fenderung errichtet. Diese besteht aus hölzernen Flößen, welche sich horizontal gegen stählerne Dalben abstützen.

Die ausführende Baufirma BeMo Tunneling GmbH hat sich dafür entschieden, am Ufer bis zu rund 6 m hohe Arbeitsebenen aus bewehrter Erde herzustellen (siehe Abbildung 4). Diese lagern im mittleren Bereich auf der bestehenden Schwergewichtswand, im Osten und Westen auf neu hergestellten, tief gegründeten Fundamenten auf. Die Baustellen-Zuwegung erfolgt über eine kanalparallele, lange Rampe von Osten. Vom obersten Niveau der Arbeitsebene aus bewehrter Erde aus wird die untere Bohrpfahlwand abgeteuft. Nach einem Teilabtrag der Arbeitsebene werden die Bohrpfähle rückverankert. Danach erfolgt die Herstellung der Kies-Sand-Säulen und das Einbringen der Spundwand. Nach einem weiteren Aushub werden die Spundwand- und Bohrpfahlwandkopfbalken errichtet und die Wände mit Horizontalankern gekoppelt. Die Spundwand wird zusätzlich mit Stahlbetonfertigteilen gepanzert.

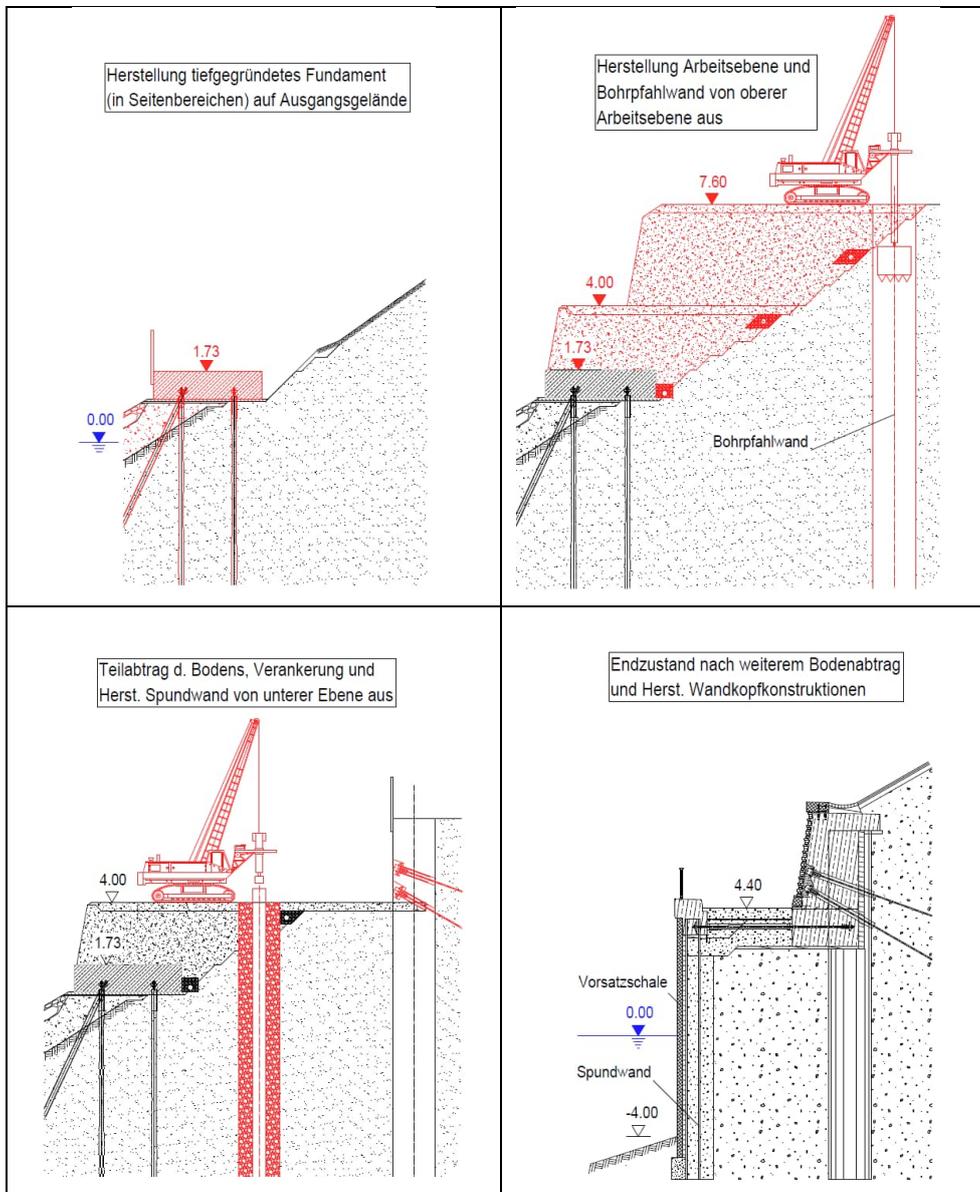


Abbildung 4: Wesentliche Bauzustände zur Herstellung der unteren Ufereinfassung, (Quelle: sinngemäß nach BEMO Tunneling GmbH)

4 Ausbildung der Details

Die komplexe Ufersicherung erforderte eine hohe Zahl von zum Teil ungewöhnlichen Details. Aufgrund der hohen statischen Relevanz muss ein Grundwasseraufstau hinter der Spundwand ausgeschlossen werden. Auf die hierfür getroffenen Maßnahmen wird im Folgenden eingegangen.

Oberflächenwasser, welches sich auf dem Betriebsweg hinter der Spundwand sammelt, wird über ein System von Schachtabläufen und Rohrleitungen direkt in den NOK eingeleitet. Der NOK wirkt als Vorfluter für das umgebende Gelände. Die untere Bohrpfahlwand ist aufgrund ihrer aufgelösten Ausführung (Pfahlabstand = halber Pfahldurchmesser) hydraulisch offen. Hinter der Spundwand könnte sich jedoch Hangwasser aus der landseitigen Böschung aufstauen, zumal die Spundwand in bindige Bodenschichten einbindet.

Es ist daher geplant, die Spundwand in zuvor hergestellte überschnittene Kiessand-Säulen einzu vibrieren. Im Zuge der Herstellung der Kiessand-Säulen werden ggf. vorliegende Hindernisse (z. B. Blöcke) beseitigt, sodass die Einbringung der Spundwand ungestört möglich sein sollte. Darüber hinaus wirken die Kiessand-Säulen im Endzustand als flächige Drainage-Schicht. Das Drainage-Material musste so gewählt werden, dass im Zusammenwirken mit den landseitig anstehenden natürlichen Böden die mechanische Filterstabilität und die hydraulische Wirksamkeit sichergestellt ist. Nach Abstimmungen mit der BAW als geotechnischem Sachverständigen wurde ein gewaschenes Kies-Sand-Gemisch der Körnung 0/8, Rundkorn vorgesehen.

Als weitere Maßnahme zur Vermeidung eines Grundwasseraufstaus werden in Abständen von rund 9 m Öffnungen in der Spundwand und der vorgesetzten Stahlbeton-Panzerung angeordnet, hierzu siehe Abbildung 5. In Kernbohrungen mit einem Durchmesser von rund 300 mm werden ummantelte Dränrohre („Filterpatronen“) DN220 mit leichtem Gefälle gesetzt. Diese Dränrohre binden ca. 0,5 m in die flächige Drainage ein. Die Schlitzweite der Dränrohre beträgt 1 mm, um ein Zusetzen durch Sandeintrag zu verhindern. Bei Bedarf ist auch eine Reinigung der Rohre von der Wasserseite aus möglich. Um gleichzeitig eine Verockerung bzw. Versinterung zu vermeiden, wird wasserseitig ein sogenannter Mönch angeordnet. Dabei handelt es sich um einen Überlaufkasten aus nichtrostendem Stahl, welcher bei erhöhtem erdseitigem Wasserstand gewährleistet, dass die Dränrohre permanent unter Wasser stehen und somit nicht dem austretenden Wasser und der Atmosphäre gleichzeitig ausgesetzt sind.

Für die ständige Bemessungssituation wurde erdseitig der Spundwand ein Wasserstand von + 0,8 mNHN festgelegt. Die Höhenlage der Entwässerung wurde so gewählt, dass eine Überschreitung dieses Wasserstandes nahezu ausgeschlossen ist. Zusätzlich werden in den Kiessand-Säulen insgesamt sechs dauerhafte Pegel angeordnet und die Wasserstände kontinuierlich überwacht.

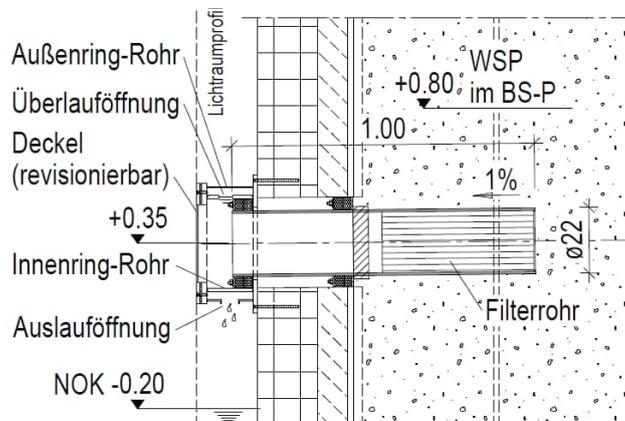


Abbildung 5: Entwässerung der Spundwand durch mit Filterpatronen ausgebaute Öffnungen und Überlaufkästen zur Gewährleistung des dauerhaften Luftabschlusses

5 Zusammenfassung und Danksagung

Im Zuge des Ersatzneubaus der 1. Hochbrücke Levensau muss der Nord-Ostsee-Kanal (NOK) beidseitig verbreitert werden. Aufgrund der herausfordernden Randbedingungen wurde für die Südseite ein komplexes System aus interagierenden Bohrpfehlwänden und einer Spundwand geplant und numerisch nachgewiesen. Bei der Planung musste großes Augenmerk auf die Bauzustände und der parallelen Nutzung des NOK durch die Schifffahrt gelegt werden. Für die dauerhafte und zuverlässige Ableitung des Grundwassers hinter der Spundwand wurde eine außergewöhnliche Detaillösung gefunden.

Abschließend bedanken wir uns herzlich bei allen Beteiligten für die vorbildliche Zusammenarbeit während der Planung und Bauausführung!

6 Literatur

- [1] BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU: Ersatzneubau der Hochbrücke Levensau, Geotechnischer Bericht, 15.03.2013
- [2] BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU: Ersatzneubau der alten Levensauer Hochbrücke und Ausbau des Nord-Ostsee-Kanals, Zusammenfassende hydrogeologische Stellungnahme, 18.03.2015
- [3] MEISEL, A., ALBIKER, J., DRUDE, O., RASMUS, A., SEPPMANN, M.: 128 Jahre 1. Hochbrücke Levensau – das Kanalufer: Boden-Bauwerks-Interaktion von interagierenden Bohrpfehlwänden, In: Bauingenieur BD.98 (2023) Nr. 3, S. 53-64
- [4] WASSERSTRABEN UND SCHIFFFAHRTSVERWALTUNG DES BUNDES: WASSERSTRABEN- UND SCHIFFFAHRTSAMT NOK: www.wsa-nord-ostsee-kanal.wsv.de/Webs/WSA/WSA-Nord-Ostsee-Kanal/DE/0_Startseite/startseite_node.html (Zugriff in 11/2023)