

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Author's Postprint

Pohl, Martin; Abratis, Joachim

Planung und Bau der 5. Schleusenkammer in Brunsbüttel

Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/110448>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Pohl, Martin; Abratis, Joachim (2020): Planung und Bau der 5. Schleusenkammer in Brunsbüttel. In: Institut und Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt (Hg.): Beiträge zum 27. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium am 12. März 2020. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt. Darmstadt: TU Darmstadt, Institut und Versuchsanstalt für Geotechnik. S. 93-101.

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.



**Erstveröffentlichung in: Institut und Versuchsanstalt für Geotechnik der
Technischen Universität Darmstadt (Hg.) (2020):
Beiträge zum 27. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium am 12. März 2020.
Darmstadt, Deutschland, TU Darmstadt, Institut und Versuchsanstalt für Geotechnik,
S. 93-101.**

Planung und Bau der 5. Schleusenammer in Brunsbüttel

Martin Pohl^a, Joachim Abratis^b

^a Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg

^b Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Brunsbüttel

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 Wasserstraße 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.

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, Stahlwasserbaus sowie der maschinen- und elektrotechnischen Anlagen zur Aufrechterhaltung der Verkehrs- und Betriebssicherheit.

Aufgrund der Art der erforderlichen Sanierungsarbeiten 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 Schleusenammer, der sog. 5. Kammer, erforderlich, sodass der Schifffahrt immer zwei große Schleusen zur Verfügung stehen. Für die Lage der 5. Kammer wurden verschiedene Varianten untersucht. Als Kriterien wurden Aspekte wie Nautik, Grundstücksgrenzen, bestehende 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, links) und der Kleinen Schleuse im Süden (Bild 1, rechts).



Bild 1: Baustelle der 5. Schleusenammer auf der Schleuseninsel (Jahr 2018)

2 Baugrund

Zur Erkundung des Baugrunds wurden rund 2.100 Meter Bodenproben erbohrt und im geotechnischen Labor umfassend untersucht. Der Baugrundaufbau im Bereich der Schleusenanlage Brunsbüttel kennzeichnet sich durch eiszeitliche Ablagerungen in größeren Tiefenbereichen ab etwa 35 m unter Geländeoberkante (GOK) sowie darüber befindlichen jüngeren Ablagerungen infolge des nacheiszeitlichen Meeresspiegelanstiegs (Bild 2). Im Konkreten steht von der GOK bis in eine Tiefe von etwa 25 m weicher Klei an. Der Klei besteht aus einer vertikalen wiederholenden Abfolge von Ton, Schluff und Feinsand in unterschiedlicher Ausprägung. Unterlagernd folgen gut tragfähige Sande mit Kiesanteilen. In dieser Bodenschicht gibt es eine Abfolge mit eiszeitlichen bindigen Ablagerungen in Form von Beckenton und Geschiebemergel; überwiegend fester Konsistenz. Durch periglaziale Prozesse ist der Geschiebemergel lokal stark aufgearbeitet und mit Sand durchsetzt, sodass kleinräumige Änderungen auftreten.

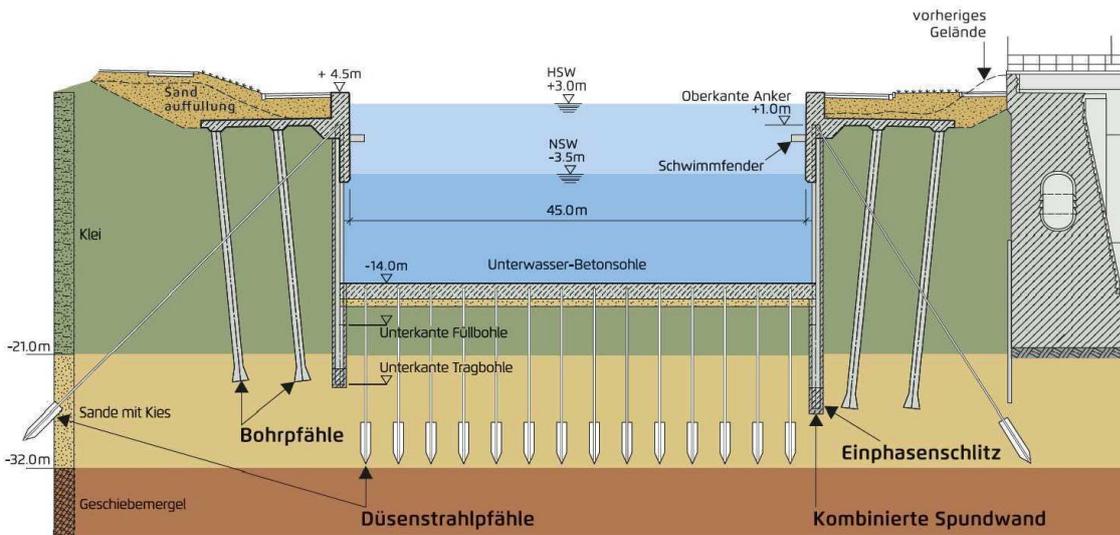


Bild 2: Querschnitt Schleusenammer (schematisch)

Beim Laborprogramm sind besonders die ausgeführten Triaxial- und Oedometerversuche an bindigen Bodenproben zur Herleitung realitätsnaher Bodenkennwerte für die Bemessung der Bauteile sowie des spannungsabhängigen Tragfähigkeitsverhaltens hervorzuheben. Eine Aufgliederung und detaillierte Betrachtung der Versuchsergebnisse am Klei in die prägenden sandigen, schluffigen und tonigen Eigenschaften ermöglichten das Bodenverhalten zutreffender zu erfassen, als wenn alle Versuchsergebnisse im p-q-Diagramm aufgetragen werden (Tabelle 1, *kursiv*). Aus planerischen und baupraktischen Aspekten wurde aus der Gesamtheit der Ergebnisse ein zusammenfassender Parametersatz für den Klei auf der sicheren Seite liegend angegeben (Tabelle 1, *fett*).

Tabelle 1: Hergeleitete vs. charakteristische Bodenkennwerte vom Klei

Bodenart	Phi in ° hergeleitet	c in kPa hergeleitet	Phi in ° charakt.	c in kPa charakt.
Sandiger Klei	36,5	6,3	32,5	3
Sandiger Schluff	35,7	5,5	32,5	3
Toniger Klei	31,4	13,2	28	10
Klei gesamt	36,1 (<i>p-q alle</i>)	1 (<i>p-q alle</i>)	30	3

Die Unterteilung in sandigen und tonigen Klei war zudem für die Verwendung des Aushubmaterials für Deichschutzmaßnahmen relevant. Hierfür wurde der Klei gemäß EAK (2002) weitergehend untersucht und bewertet.

3 Einfluss der Nachbarbebauung auf Planung und Herstellung

Unter Berücksichtigung des Baugrundaufbaus wurden die Auswirkungen von Rammerschütterungen beim Neubau der 5. Schleusenammer betrachtet. Dabei waren besonders die in unmittelbarer Nähe liegenden, alten und bautechnisch sehr empfindlichen Schleusen zu berücksichtigen, da deren Betrieb ohne Einschränkungen durchgehend gewährleistet sein muss. Im Ergebnis der

Untersuchungen dürfen in weiten Bereichen der geplanten 5. Kammer nur erschütterungsarme Bauverfahren eingesetzt werden. Das Einbringen von Stahlprofilen mittels Schlag- oder Vibrationsrammung schied somit aus. Es sind erschütterungsarme d. h. greifende oder bohrende Bauverfahren einzusetzen.

Bei der Wandherstellung entschied man sich für die Herstellung einer gegreiferten Dichtwand, in die Stahlprofile als kombinierte Spundwand eingestellt werden. (Bild 2). Aus der Bemessung der Kammerwände ergaben sich Rückverankerungskräfte bis zu 2600 kN. Weil für die Rückverankerung nur bohrende Verfahren in Betracht kamen, entschied man sich für die Herstellung sog. Düsenstrahlpfähle (Abschnitt 5).

4 Grundwasserverhältnisse

Zur Herleitung der bemessungsrelevanten Grundwasserstände wurden Porenwasserdruckmessgeber in ausgewählten Bohrungen eingebaut. Die Messdaten werden an die BAW gesendet, wo sie aufbereitet, visualisiert und allen Beteiligten quasi live zur Verfügung gestellt werden. Die Datenanalyse ergab, dass das Grundwasser in den Sanden mit den tidebeeinflussten Wasserständen in der Elbe kommuniziert und ähnliche Druckhöhen aufweist; während das Grundwasser im darüber befindlichen Klei von meteorologischen Ereignissen dominiert wird (Schulze, Pohl 2011). Ein Meeresspiegelanstieg um 90 cm wurde in die Betrachtungen ebenso einbezogen.

Die Analyse der Grundwasserbeschaffenheit ergab, dass in der Tiefenlage der Rückverankerungen in den Sanden ein schwach angreifender Betonangriff (XA1) durch Sulfat (treibender Angriff) und Ammonium (lösender Angriff) besteht. Die gemessenen Werte liegen für SO_4 zwischen 230 und 340 mg/l für NH_4 zwischen 16 und 25 mg/l (Bild 3). Eine weitergehende Betrachtung ergab zudem, dass durch den elbseitigen Salzwassereinfluss, gekennzeichnet durch negative Basenaustauschindexe (BEX), die Ammoniumkonzentration abnimmt. Die Abgrabungen der Schleuseninsel zum Bau des elbseitigen Vorhafens werden - durch das zutretende Salzwasser - zu einer Verringerung der Ammoniumkonzentrationen führen.

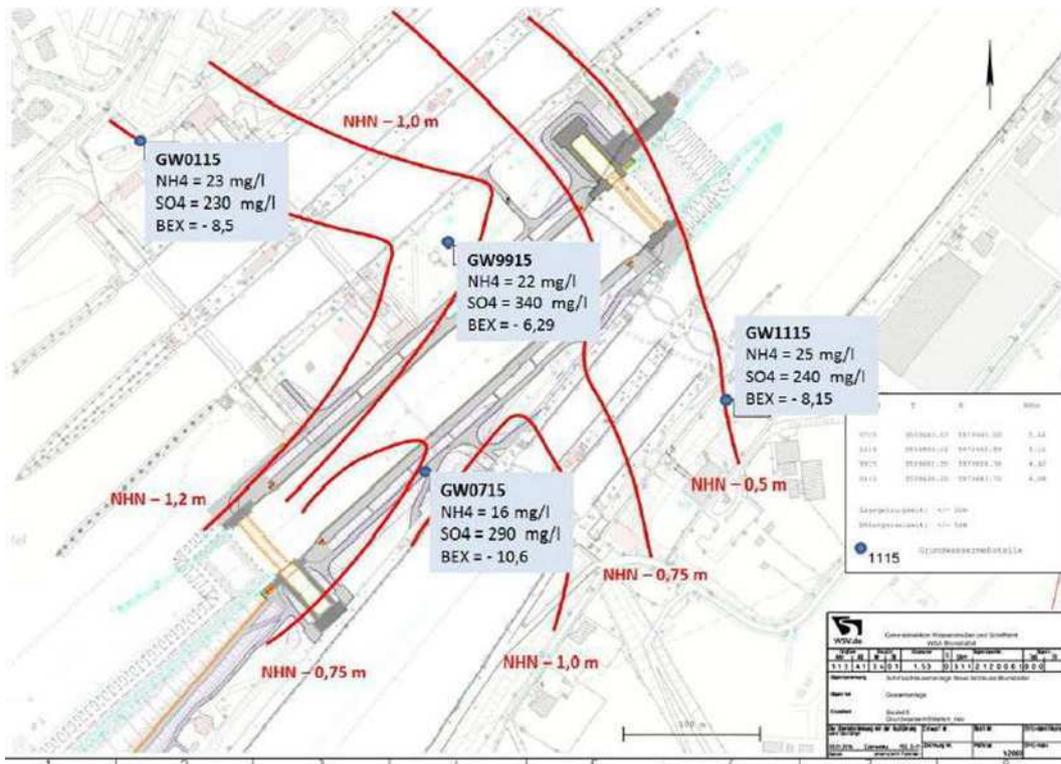


Bild 3: Grundwassergleichenplan mit Stoffkonzentrationen (Ist-Zustand)

Während dem Sulfatangriff mit einem HS-Zement begegnet werden kann, bestehen für den Ammoniumangriff keine betontechnologischen Begegnungsmöglichkeiten. Dem aktuellen technischen Stand, d. h. der DIN 4030-1: 2008 folgend, wurden die Konsequenzen für das Rückverankerungselement berücksichtigt (Abschnitt 5). Untersuchungen von Rechenberg, Sylla (1993) legen jedoch nahe, dass erst bei weitaus höheren Ammoniumkonzentrationen Auswirkungen für einen Beton zu erwarten sind.

5 Düsenstrahlpahl zur Rückverankerung

Beim Düsenstrahlverfahren wird der Boden mit einem Schneidstrahl aufgeschnitten und mit Zement versetzt. Von besonderer Bedeutung für das Ergebnis der somit herzustellenden Düsenstrahlsäule sind neben dem Wasser-Zement-Gehalt, der Zieh- und Rotationsgeschwindigkeit, die an der Düsenöffnung herrschenden Drücke sowie auch Durchmesser, Anordnung der Düsenöffnung und dessen Verschleiß (Sondermann 2012; Krentz 2015; Bergschneider 2002).

Durch Inhomogenitäten im Baugrund, wie Lagerungsdichte und Kornfraktion, ergibt sich eine unterschiedliche Eindringtiefe für den Schneidstrahl. Hieraus resultiert eine Düsenstrahlsäule mit keiner rein zylindrischen Form, sondern mit gewissen Einbuchtungen und Auskragungen. Dieses Verhalten macht man sich für die dauerhafte Rückverankerung unter Ammoniumangriff zu nutze.

Bei einem verpressten Rückverankerungselement würde der Verspannungsdruck durch den lösenden Angriff abfallen (Domes 2015) und das Bauteil versagen. Durch die unregelmäßige Verzahnung

der Düsenstrahlsäule mit dem Baugrund wird eine Kraftübertragung auch bei einer prognostizierten Betonkorrosionszone von 1mm / 100 Jahre gewährleistet.

Dementsprechend wurden für die 5. Kammer die sog. Düsenstrahlpfähle als Rückverankerungselemente geplant. Diese bestehen aus einer Düsenstrahlsäule mit einem Durchmesser von 1,0 m und Längen bis zu 7,5 m, in die ein Stahlzugglied (Durchmesser bis 14 cm) eingestellt wird (Bild 2). Es ist also ein „Pfahl“ mit begrenzter Krafteinleitungslänge. Da eine solche Art der Rückverankerung kein übliches und daher auch kein allgemein bauaufsichtlich zugelassenes Verfahren ist, wurden einzuhaltende Kriterien zur Gewährleistung eines dauerhaft hoch tragfähigen Düsenstrahlpfahls für die geplante Nutzungsdauer von 100 Jahren definiert. Diese mündeten in einer „Zustimmung im Einzelfall“ (ZiE), welche durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur erlassen wurde. Die kennzeichnenden Eigenschaften der herzustellenden Düsenstrahlpfähle sind: $w/z = 0,6$, Mindestfestigkeitsklasse C25/30, Mindestzementgehalt 280 kg/m^2 , Durchmesser $\geq 1,0 \text{ m}$.

Grundlage der Bewertung waren u.a. umfassende Versuche vor der eigentlichen Baumaßnahme, bei denen mehrere Düsenstrahlkörper mit verschiedenen Geräteparametern in den Sanden mit Kies hergestellt wurden (siehe auch Kunth et al 2014). Die prinzipielle Eignung des Düsenstrahlverfahrens für die Baumaßnahme war erforderlich nachzuweisen, weil die geplanten w/z -Werte von 0,5 für das Düsenstrahlverfahren ungewöhnlich gering sind (Tabelle 2). Tast- und Kernbohrungen sowie beton-technologische Untersuchungen ließen auf ein geeignetes Rückverankerungselement unter den gegebenen Bedingungen schließen. Von besonderer Bedeutung der Untersuchungen war ein scharfer Übergang zwischen dem Beton der Düsenstrahlsäule und dem umgebenden Baugrund (Bild 4), um einen dauerhaften Lastabtrag unter Ammoniumangriff zu gewährleisten.



Bild 4: Scharfer Übergang von der Düsenstrahlsäule zum Baugrund

Darauf aufbauend wurden mehrstufige Probelastungen auf Zug durchgeführt. Die aufgebrachte Maximalkraft betrug hierbei 4.300 kN. Selbst bei dieser hohen Last betragen die bleibenden Verformungen lediglich drei Zentimeter. Im Ergebnis konnte nachgewiesen werden, dass mit den definierten Herstellparametern und den eingesetzten Baumaschinen die geforderten Eigenschaften eines hoch tragfähigen und beständigen Düsenstrahlpfahls erzielt werden können.

Im Rahmen des eigentlichen Bauvorhabens wurden die Herstellparameter für die Düsenstrahlpfähle für die eingesetzte Gerätekonfiguration ebenfalls erfolgreich ermittelt (Tabelle 2). Diese unterscheiden sich deutlich von den Herstellparametern bei den Vorversuchen. Die Tragfähigkeit der Düsenstrahlpfähle konnte ebenso erfolgreich durch separate Probelastungen und Abnahmeprüfungen an jedem Bauwerkspfahl nachgewiesen werden.

Parameter	Vorversuche	Baumaßnahme
Düsendurchmesser	2x4mm	1 x 5,5 mm
1. Düsphase	400 bar, w/z = 0,8 Vzieh = 20 cm/min Rotation = 10 U/min	400 bar, w/z = 2,5 Vzieh = 20 cm/min Rotation = 10 U/min
2. Düsphase	150 bar, w/z = 0,5 Vzieh = 38 cm/min Rotation = 19 U/min	400 bar, w/z = 0,8 Vzieh = 10 cm/min Rotation = 5 U/min
Gemessener Säulendurchmesser (m)	0,95 bis 1,1	1,0 bis 1,4
Baugrund in Tiefenlage	Sande mit Kies großer bis sehr großer Festigkeit	Sande mit Kies mittlerer bis sehr großer Festigkeit
Durchmesser Stahlzugglied (mm)	130	120
Wendel auf Stahlzugglied	14x14 mm, s = 10 cm und 20x20 mm, s = 10 cm	14x14 mm, s = 10cm
Zementaustausch im Bereich Stahlzugglied	w/z = 0,45	w/z = 0,45

6 Nachhaltigkeit bei der Düsenstrahlpfahl-Herstellung

Der Zementverbrauch bei den derzeit hergestellten Düsenstrahlpfählen liegt bei etwa 2,9 to pro laufendem Meter. Bei einem 7,5 m langem Pfahl also etwa 21,7 to Zement. Bedenkt man, dass über 1000 Düsenstrahlpfähle herzustellen sind, wurden Betrachtungen angestellt, um den Verbrauch zu reduzieren. Durch eine Variation der Herstellparameter, d.h. Düsdrücke, Rotations- und Ziehgeschwindigkeiten (in den unterschiedlichen Herstellungsphasen) sowie des w/z-Wertes konnte der theoretisch erforderliche Zementverbrauch um bis zu 40% gesenkt werden, wobei eine weitergehende Verifikation noch aussteht.

7 Bohrfahlherstellung mit Fußaufweitung

Ein weiteres Bauteil mit einer Besonderheit sind die Bohrfähle mit Fußaufweitung (Bild 2). Aufgrund der leichten Neigung der Pfähle mit einer Aufweitung im Fußbereich ergeben sich hohe Anforderungen an die Ausführung. Während der Bohrfahl im oberen Bereich verrohrt hergestellt wird, ist der aufzuweitende Fußbereich durch eine geeignete Suspension im Bohrloch gesichert. Die Suspension muss dabei auf die umgebenden Baugrundeigenschaften, wie Kornverteilung und Lagerungsdichte, abgestimmt werden. Für die Fußaufweitung selber muss ein spezielles Werkzeug eingesetzt werden. Der maßgebende Vorteil ist, dass durch die Fußaufweitung höhere Tragfähigkeiten erzielt werden können. Durch Probelastungen (auf Druck) wurde die Tragfähigkeit der Bohrfähle erfolgreich nachgewiesen. Die aufgebrauchte Maximalkraft betrug 4.950 kN.

Literatur

- Bergschneider, B. (2002): Zur Reichweite beim Düsenstrahlverfahren im Sand. Bergische Universität Wuppertal, Fachbereich Bauingenieurwesen, Bodenmechanik und Grundbau, Bericht 24, 2002
- DIN 4030-1 (2008): Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase – Teil 1: Grundlagen und Grenzwerte. Beuth-Verlag
- Domes, X. (2015): Cement grouting during installation of ground anchors in non-cohesive soils. Norwegian University of Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering, 2015
- EAK (2002): Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken durch den Ausschuss für Küstenschutzwerke. Die Küste, Heft 65, 2002 (korrigierte Ausgabe 2007)
- Krentz, M. (2015): Zur guten fachlichen Praxis des Düsenstrahlverfahrens. Geotechnik 38, Heft 1, 2015
- Kunth, F., Ackermann, J., Beutel-Scholz, A. (2014): Vorgezogene Pfahlprobelastungen an Düsenstrahlpfählen zum Bau der 5. Schleusenkammer in Brunsbüttel. 33. Baugrundtagung, Tagungsband, 2014
- Rechenberg, W., Sylla, H.-M. (1993): Die Wirkung von Ammonium auf Beton. Beton 1, S. 26-31
- Sondermann, W. (2012): Die Reichweite des Schneidstrahls beim Düsenstrahlverfahren - Einflussfaktoren. 32. Baugrundtagung, Tagungsband, 2012
- Schulze, P., Pohl, M. (2011): Porenwasserdruckmessungen für den Seeschleusenneubau Brunsbüttel. BAWKolloquium Geohydraulische Erkundungsverfahren, Tagungsband, 2011

Autoren

Dr. Martin Pohl
Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg
Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg

Joachim Abratis
Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Brunsbüttel
Alte Zentrale 4, 25541 Brunsbüttel
E-Mail: joachim.abratis@wsv.bund.de