

# Ein technisches Unikat – Rückverankerung mit Düsenstrahlpfählen bei der 5. Schleusenammer Brunsbüttel

Dr.-Ing. Martin Pohl, Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg  
Dipl.-Ing. Joachim Abratis, Wasserstraßen-Neubauamt Nord-Ostsee-Kanal, Brunsbüttel  
Dipl.-Ing. Gabriele Peschken, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

*Bei Europas derzeit größter Wasserbaustelle, dem Neubau der 5. Schleusenammer in Brunsbüttel, kommen zur Rückverankerung der Schleusenammerwände und –sohle sog. Düsenstrahlpfähle zum Einsatz. Der Einsatz dieser Elemente wurde aufgrund mehrerer Aspekte erforderlich:*

- im Nahbereich der über 100 Jahre alten Schleusen darf nicht gerammt werden
- betonangreifendes Grundwasser (Ammonium und Sulfat) kommt in relevanten Anteilen im Lastabtragungsbereich vor
- vergleichsweise hohe Lasten bis zu 2600 kN müssen abgetragen werden

*Die Düsenstrahlpfähle 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. Es ist also ein „Pfahl“ mit begrenzter Krafteinleitungslänge. Da für derartige Düsenstrahlpfähle keine bauaufsichtliche Zulassung besteht, wurde vom BMVI eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) im Jahr 2013, nach umfangreichen Untersuchungen und theoretischen Betrachtungen, erteilt. Die Düsenstrahlpfähle wurden gewählt, weil beim Aufdüsen des Baugrundes durch unterschiedliche Erosionswiderstände eine Verzahnung der Düsenstrahlsäule mit dem Baugrund entsteht. Somit wird, unter Einsatz eines Zementes mit einem geringen w/z-Wert von 0,6, eine dauerhafte Lastabtragung, selbst bei Betonangriff, gewährleistet. Die Düsenstrahlpfähle kommen in Tiefen ab 25 m u. GOK. (in den tragfähigen Sanden) zum Einsatz. Im Zuge des Baufortschritts der 5. Schleusenammer wurde ein Großteil der geplanten Düsenstrahlpfähle mittlerweile erfolgreich hergestellt.*

*Durch mehrere Probelastungen wurde die hohe Tragfähigkeit bei vergleichsweise geringen Verformungen nachgewiesen. Zudem werden zusätzliche qualitätssichernde Abnahmeprüfungen durchgeführt. Im Vergleich aller Prüfungen zeigt sich bisher ein recht einheitliches Last-Verformungsverhalten. Zur Validierung der Materialeigenschaften und zur Ermittlung des Durchmessers wurden Kernbohrungen sowie ergänzende seismische Volumenmessungen vorgenommen. Umfangreiche Betrachtungen zu den Grundwassereigenschaften erlaubten im Projektfortschritt die Anforderungen an die Materialeigenschaften der Düsenstrahlsäulen abzumindern. Diese Schlussfolgerungen hatten direkte Auswirkungen auf die Herstellparameter. Durch eine Variation der Herstellparameter, d.h. Düsdrücke, Rotations- und Ziehgeschwindigkeiten (in unterschiedlichen Herstellungsphasen) sowie die Größe und Anzahl der Düsöffnungen sowie des w/z-Wertes konnte der theoretisch erforderliche Zementverbrauch um bis zu 40% gesenkt werden. Mittels umfangreicher numerischer Methoden wurde zudem das Gesamttragverhalten der Schleusenammerwand mitsamt Rückverankerung für unterschiedliche Lastzustände analysiert. Hierbei zeigte sich, dass aufgrund der hohen Gesamtsteifigkeit des Systems nur geringe Verformungen resultieren.*

## 1 Einleitung

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 meistbefahrenere 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. 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 Schleusenkammer, der sog. 5. Kammer, erforderlich, sodass der Schifffahrt 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. Schleusenkammer auf der Schleuseninsel, d. h. zwischen der Großen Schleuse im Norden (Abbildung 1, links) und der Kleinen Schleuse im Süden (Abbildung 1, rechts).



Abbildung 1: Baustelle der 5. Schleusenkammer (Jahr 2021)

## 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 (Abbildung 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.

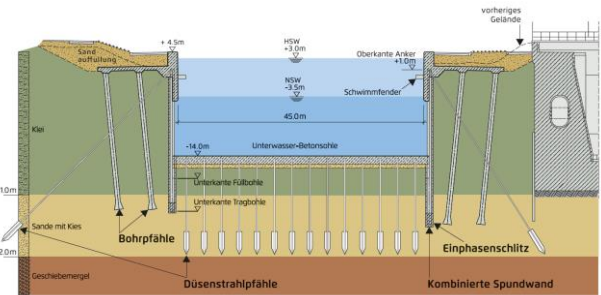


Abbildung 2: Querschnitt Schleusenkammer (schematisch)

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 technisch zutreffend sowie wirtschaftlich optimiert zu erfassen (Pohl & Abratis 2020). Für eine Verwendung des Aushubmaterials für Deichschutzmaßnahmen war eine Unterteilung in sandigen und tonigen Klei 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 geplanten Neubau der 5. Schleusenkammer 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 d. h. greifende oder bohrende Bauverfahren eingesetzt werden. Das Einbringen von Stahlprofilen mittels Schlag- oder Vibrationsrammung schied somit aus.

Bei der Wandherstellung entschied man sich für die Herstellung einer gegreiferten Dichtwand, in die Stahlprofile als kombinierte Spundwand eingestellt werden. (Abbildung 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. Erfahrungen mit dieser Art von Rückverankerungselementen liegen nur im übertragenen Sinne vor und werden in Abschnitt 5 diskutiert.

## 4 Grundwasserverhältnisse

Zur Herleitung der tiefenabhängigen Grundwasserverhältnisse wurden Porenwasserdruckaufnehmer in ausgewählten Bohrlöchern eingebaut. Zudem wurden einige Bohrungen zu Brunnen ausgebildet; mit Filterstrecken in verschiedenen Tiefenlagen. 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 säkularer 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 gemäß DIN 4030-1: 2008) durch Sulfat (treibender Angriff) und Ammonium (lösender Angriff) besteht. Die gemessenen Werte liegen für SO<sub>4</sub> zwischen 230 und 340 mg/l, für NH<sub>4</sub> zwischen 16 und 25 mg/l (Abbildung 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. Ein Vergleich der Grundwasserbeschaffenheit in verschiedenen Tiefenlagen ergab zudem, dass etwa 2 Meter unter der Kleischicht die Ammoniumkonzentrationen um 5 bis 10 mg/l höher sind gegenüber der Tiefenlage der Rückverankerung (Pohl et al 2020).

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 (siehe Abschnitt 5). Anzumerken ist: dass die angegebenen Grenzwerte in der DIN seit 1969 Bestand haben und mit jenen in den entsprechenden Normen in Großbritannien, den Niederlanden, Frankreich und Belgien identisch sind. Untersuchungen von Rechenberg & Sylla 1993 legen jedoch nahe, dass erst bei weitaus höheren Ammoniumkonzentrationen Auswirkungen für einen Beton zu erwarten sind.

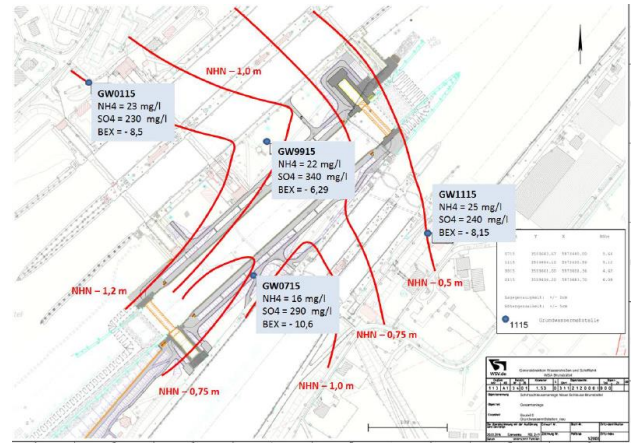


Abbildung 3: Grundwassergleichenplan mit Stoffkonzentrationen

## 5 Düsenstrahlpfähle

### 5.1 Düsenstrahlverfahren für Säulen und 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 deren Durchmesser, deren Anordnung und 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 im vorliegenden Fall für die dauerhafte Rückverankerung unter betonangreifendem Ammonium zu nutze. Bei einem „üblichen“ verpressten, annähernd ebeneförmig zylindrischen Rückverankerungselement würde hingegen der Verspannungsdruck und damit die Mantelreibung bereits durch geringe Betonkorrosion infolge lösenden Angriffs abfallen (Domes 2015) und das Bauteil versagen. Die unregelmäßige Verzahnung der Düsenstrahlsäule mit dem Baugrund gewährleistet hingegen eine Kraftübertragung über Druckkräfte auch bei einer prognostizierten Betonkorrosionszone von 1mm in 100 Jahren, wenn die geforderten Eigenschaften gemäß Abschnitt 5.2 eingehalten werden.

Erfahrungen mit dem Düsenstrahlverfahren und auch deren vereinzelte Anwendungen bei Rückverankerungen sind in der Literatur dokumentiert. Eine besondere Bedeutung ist dem Erfahrungswissen der bauausführenden Firma beizumessen. Die auf den Baugrund abgestimmte Gerätetechnik sowie die Herstellungsparameter sind für das Ergebnis

entscheidend. Die für die 5. Schleusenkammer projektrelevanten Aspekte werden nachfolgend zusammengefasst:

Bei Krentz 2015 und Kayser et al 2007 werden Sedimentationsprozesse und andere beobachtete nachteilige Effekte der Zementsuspension in Düsenstrahlsäulen beschrieben, die zu gering tragfähigen Materialeigenschaften im Kopfbereich führen können.

Die Herstellung geneigter Düsenstrahlpfähle in hinterfülltem Sand wird in Bautechnik Aktuell 2000 dargestellt. Nach dem Abteufen einer verrohrten Bohrung wurde das Stahlzugglied eingebaut. Am Fuß der Außenverrohrung war eine Düse angebracht, mittels derer die Düsenstrahlsäule beim Ziehen und Rotieren der Verrohrung hergestellt wurde. Die Düsenstrahlsäule hatte einen Durchmesser von etwa 1,0 m und eine Länge von etwa 4,5 m. Ferner werden die Ergebnisse von Mehrstufentests an derartig hergestellten Düsenstrahlpfählen diskutiert. Bei aufgebrachtten Zugkräften von 2788 kN resultierten bleibende Verformungen von 4,8 mm. Durch die Verwendung einer Stahlwendel (10x10 mm) mit einer höheren inneren Tragfähigkeit konnten Kräfte bis zu 3100 kN aufgebracht werden.

Köster & Dietz 2006 diskutieren die Herstellung von Mikropfählen mit einer Länge von 10,5 m in gut tragfähigen Sanden, die am Fußende über eine Länge von etwa 2,5 m mit einer Düsenstrahlsäule (Durchmesser etwa 1,0 m) verstärkt sind. Beim Verlust der Tragfähigkeit der Mikropfähle durch kalklösende Kohlensäure, soll der Erdwiderstand am Kopf der Düsenstrahlsäule aktiviert werden. Probelastungen mit Kräften von bis zu 1700 kN führten zu Verformungen von 48 mm.

Lu et al 2020 präsentieren die Herstellparameter und -ergebnisse von vorgespannten Düsenstrahlankern in schluffigem Ton. Die Düsöffnungen betragen 2,5 mm bzw. 2,7 mm mit einer Neigung von 13,5°, der Düsdruck 30 bis 30 MPa, die Ziehgeschwindigkeit 8 bis 10 cm/min, die Rotationsgeschwindigkeit 12 bis 15 U/min. Mit diesen Parametern wurden Düsenstrahlsäulen mit einem Durchmesser von etwa 50 cm nachgewiesen.

Xu et al 2014 stellen Düsenstrahlankerpfähle vor. Diese bestehen aus einer Düsenstrahlsäule mit einem Durchmesser zwischen 40 und 100 cm, in die Ankerplatten eingebaut sind. Bei Probelastungen in weichem schluffigem Ton wurden Kräfte bis zu 500 kN, bei Verformungen von 8-14 cm, abgetragen.

Modoni et al 2010 beschreiben umfassend Probelastungen an Düsenstrahlpfählen in dicht gelagertem Sand. Für die Herstellung wurde ein Zement CEM II BS 32,5R mit einer Dichte von 1500 kg/m<sup>3</sup> eingesetzt. Die Düsdrücke betragen 35 MPa; 2 Düsen mit Durchmessern von 2,5 mm und Ziehgeschwindigkeiten von 1,66 cm/s wurden angewandt. Als Zugglieder kamen HEB 240-Profile zum Einsatz. Bei Zugkräften

von 1200 kN resultierten Verformungen bis zu 6 cm. Laut Bzówka 2012 haben die Düsenstrahlsäulen eine Länge von 7,0 m und einen Durchmesser von 0,6 m.

Die Ergebnisse und die Herstellung von geneigten Düsenstrahlpfählen mit einer Gesamtlänge von 33 m in locker gelagerten Böden werden von Manassero 2017 beschrieben. In einer ersten Phase wurde eine Düsenstrahlsäule mit einer Länge von 16 m und einem Durchmesser von 1,5 m hergestellt. Nach ausreichender Aushärtung wurde in diese Säule der Anker gebohrt, der aus 29 Litzen (Stahlquerschnitt 150 mm<sup>2</sup>) besteht. Die Herstellparameter der Säule werden umfangreich dargestellt: w/z-Wert 0,83, Zement III-B 42,5, Düsdruck 50 MPa, Druckluft 1 MPa, Ziehgeschwindigkeit 19,5 cm/min, Rotationsgeschwindigkeit 12 U/min. Der Anker selbst wurde mit einem Zement I 52,5, w/z-Wert 0,43 hergestellt. Zwei Mehrstufen-Belastungen bis zu 5900 kN wurden ausgeführt. Die Maximalverformungen ermittelten sich zu 78,9 mm, mit bleibenden Verformungen von 13,7 mm. Ergänzende Probelastungen bis zu 4900 kN führten zu bleibenden Verformungen von 8 mm.

Bei Brengola & Roberts 2003 wird ebenfalls ein luftummantelter Bindemittel-Schneidstrahl zur Herstellung von Düsenstrahlpfählen verwendet. In weichem bis steifem Schluff / Ton wurden Düsenstrahlsäulen mit einer Länge von 6,1 m und einem Durchmesser von 1,5 m vertikal hergestellt. Anschließend wurden 5 Zugglieder mit je 3,5 cm Durchmesser in der Säule positioniert. In den Probelastungen konnten bis zu 1335 kN, bei Maximalverformungen von 15 mm, aktiviert werden. Die bleibenden Verformungen betragen 5 mm. Dehnungsmessungen an einem Zugglied zeigten eine Lasteinleitung von 1300 kN über eine Länge von etwa 5,5 m in der Säule. Zusätzliche Kernbohrungen zur Bestätigung des Durchmessers und der Materialeigenschaften werden beschrieben.

## 5.2 Herstellparameter und Bewertungskriterien

Die Rückverankerungselemente im betonangreifenden Ammonium bei der 5. Schleusenkammer in Brunsbüttel bestehen aus einer Düsenstrahlsäule mit einer Länge bis zu 7,5 m und einem Durchmesser von 1,0 m, in die ein Stahlzugglied (Durchmesser bis zu 14 cm) eingebaut wird (Abbildung 2). Es sind also „Pfähle“ mit einer begrenzten Krafteintragungslänge. Da es für diese Art von Rückverankerungssystem keine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung gab, wurde im Jahr 2013 eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) durch das Ministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur erforderlich. In der ZiE werden Anforderungen an die Düsenstrahlpfähle formuliert, um ein hoch tragfähiges Verankerungssystem für die 100 Jahre Nutzungszeit im aggressiven Grundwasser gewährleisten zu können. Die Anforderungen an die herzustellenden Düsenstrahlpfähle sind wie folgt:

w/z-Wert = 0,6  
 Mindestfestigkeitsklasse C25/30  
 Mindestzementgehalt 280 kg/m<sup>2</sup>  
 Durchmesser ≥ 1,0 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). Es war erforderlich die prinzipielle Eignung des Düsenstrahlverfahrens für die Baumaßnahme nachzuweisen, weil die ursprünglich geplanten w/z-Werte von 0,5 (in der 2. Düsphase) für das Düsenstrahlverfahren ungewöhnlich gering sind (Abbildung 4).

Parameter	Vorversuche	Baumaßnahme
Düsendurchmesser	2 x 4 mm	1 x 5,5 mm
1. Düsphase	400 bar, w/z = 0,8 V <sub>zieh</sub> = 20 cm/min Rotation = 10 U/min	400 bar, w/z = 2,5 V <sub>zieh</sub> = 20 cm/min Rotation = 10 U/min
2. Düsphase	150 bar, w/z = 0,5 V <sub>zieh</sub> = 38 cm/min Rotation = 19 U/min	400 bar, w/z = 0,8 V <sub>zieh</sub> = 10 cm/min Rotation = 5 U/min
Gemessener Säulendurchmesser (m)	0,95 bis 1,1	1,0 bis 1,4
Säulenlänge (m)	5,5	4,5 / 7,0
Neigung zur Vertikalen (°)	0	37,5 / 55
Baugrund in Tiefenlage	Sande mit Kies großer bis sehr großer Festigkeit	Sande mit Kies mittlerer bis sehr großer Festigkeit
Durchmesser Stahlzugglied (mm)	130	90 / 120
Wendel auf Stahlzugglied	14x14 mm, s= 10cm und 20x20 mm, s=10 cm	14x14 mm, s= 10cm
Zementaustausch im Bereich Stahlzugglied	w/z = 0,45	w/z = 0,45

Abbildung 4: Herstellparameter der Düsenstrahlpfähle (Probebelastungen)

Die Düsenstrahlpfähle werden im Detail wie folgt hergestellt: Das Düsgestänge wird bis zur Unterkante des Düsenstrahlpfahls gefahren, dann beginnt die erste Düsphase gemäß Abbildung 4 und das Düsgestänge wird langsam gezogen. Dieser Vorgang wiederholt sich bei der zweiten Düsphase mit den abgeänderten Herstellparametern. In der letzten Phase wird das Düsgestänge wieder bis zur Unterkante des Düsenstrahlpfahls gefahren und das Material innerhalb der Verrohrung mit einer Zement-Suspension mit einem w/z-Wert von 0,45 ausgetauscht. Anschließend wird das Stahlzugglied eingebaut.

Durch diesen Prozess können Kies, Steine und Blöcke zur Sohle sinken und beeinflussen nicht die Kraftübertragung vom Stahlzugglied über die Säule in den Boden sowie den Herstellungsvorgang selber. Mögliche Düserschatten (Stein 2004) werden ebenso minimiert. Durch den ersten Düs Vorgang wird der erforderliche Bodenbereich aufgeschnitten und im zweiten Düs Vorgang mit der angegebenen Zementsuspension durchmischt. Hierdurch werden die

erforderlichen Materialparameter und der scharfe Übergang zwischen Düsenstrahlsäule und Boden erreicht.

Tast- und Kernbohrungen an den Düsenstrahlsäulen als auch materialtechnologische Untersuchungen belegen ein geeignetes Rückverankerungselement für die gegebenen Randbedingungen ermittelt zu haben. Durch eine ausreichende Anzahl an Kernbohrungen kann auf die Geometrie und den Durchmesser der Düsenstrahlsäule geschlossen werden (Abbildung 5). Wie in Abbildung 5 zu sehen, hat die Düsenstrahlsäule im oberen Bereich eine eher elliptische Form (gepunktete Linie) und einen Durchmesser > 1,0 m. Der untere Bereich der Düsenstrahlsäule weist eine andere Geometrie mit gewissen Einbuchtungen und Auskragungen auf. Es wurden jedoch auch Bereiche mit gering festem Material erkundet, deren Anteil jedoch unter 10% aller Kernbohrungen liegt. Daher wurde deren Einfluss auf die dauerhafte Tragfähigkeit im betonangreifenden Grundwasser als verträglich eingestuft. Eine Herausforderung bestand darin, in mehr als 25 m Tiefe die Düsenstrahlsäule in definierten Bereichen zu treffen und hochwertige Proben zu ziehen.

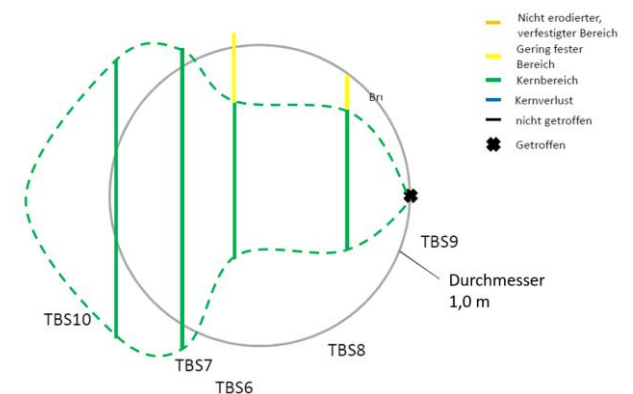
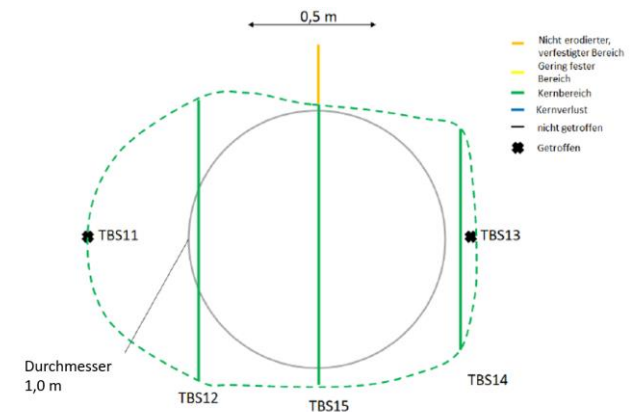


Abbildung 5: Ermittlung des Durchmessers durch Kernbohrungen (oben: oberer Säulenbereich; unten: unterer Säulenbereich)

Aus den dargelegten Gründen war es von besonderer Bedeutung einen scharfen Übergang zwischen

der Düsenstrahlsäule und dem umgebenden Boden nachzuweisen (Abbildung 6). Daher wurden die Probesäulen in der Bauphase mit der gleichen Neigung hergestellt, wie die Bauwerkspfähle.

Im Rahmen der eigentlichen Baumaßnahme wurden die gerätespezifischen Herstellparameter ebenfalls erfolgreich hergeleitet (Abbildung 4). Diese zeigen eine deutliche Abweichung von den Herstellparametern bei den Vorversuchen.



Abbildung 6: Scharfer Übergang zwischen Düsenstrahlsäule und Boden

Da die Kernbohrungen lediglich lokale Informationen über die Düsenstrahlsäulen liefern, wurden ergänzende geophysikalische Messungen ausgeführt, um eine Gesamtansicht der Säule zu erhalten. Hierfür wurden zwei Crosshole-Tests und zwei Tomographie-Messungen zwischen drei Bohrungen und hinsichtlich zweier geneigter Düsenstrahlsäulen ausgewertet. Die Durchmesser konnten lediglich mit Unschärfen ansatzweise bestimmt werden. Bei einer seismischen Geschwindigkeit von 3500 m/s wurden Durchmesser von etwa 1,3 m bis 1,7 m hergeleitet. Durch eine Änderung der seismischen Geschwindigkeit auf 3000 m/s bzw. 4000 m/s ergaben sich Änderungen der Durchmesser um etwa 30 cm. Die elliptische Form der Säulen konnte durch die Tomographie-Messungen bestätigt werden, wobei der Übergang zum gewachsenen Boden jedoch häufig nicht eindeutig bestimmbar war.

### 5.3 Tragverhalten

Ergänzend zu den zuvor beschriebenen Untersuchungen wurden begleitende Probelastungen, d.h. bei den Voruntersuchungen und in der Bauphase, vorgenommen. Aufgrund der Besonderheit des Rückverankerungssystems werden zusätzlich an 10% der Düsenstrahlpfähle qualitätssichernde Abnahmeprüfungen durchgeführt (Abbildung 7). Somit wird der fachgerechte Herstellungsprozess als auch eine ausreichende Tragfähigkeit nachgewiesen.

In Abbildung 8 ist das Last-Verformungs-Verhalten einiger Düsenstrahlpfähle, während Probelastungen und Abnahmeprüfungen, dargestellt. Die getesteten Pfähle haben mitunter unterschiedliche Lagen. Die maximale Kraft von 4300 kN wurde in einem Mehrstufentest mit Entlastungsschleife aufgebracht. Unter dieser hohen Last betrug die bleibende Verformung im Boden lediglich 2 Zentimeter. Die Last-Verformungskurven aller Düsenstrahlpfähle zeigen bei

einer Belastung bis zu 2000 kN ein ähnliches Verhalten. Bei größeren Lasten nehmen die Verformungen der kürzeren Pfähle, z.B. der Abnahmeprüfungen, zu, wohingegen die längeren Düsenstrahlpfähle ein stetiges lineares Verhalten zeigen.



Abbildung 7: qualitätssichernde Abnahmeprüfungen

Die Entlastungskurve spiegelt die elastische Verformung des Stahlzuggliedes wieder, mit einer bleibenden Bodenverformung durch die Belastungsphase. Betrachtet man die Düsenstrahlpfähle, hergestellt in der Baumaßnahme (55°, l=7,0 m), so ist ersichtlich, dass die Dehnung des Stahlzuggliedes das Last-Verformungsverhalten dominiert. Unter 4300 kN beträgt die Stahldehnung 77 mm, bei einer Gesamtverformung von 92 mm.

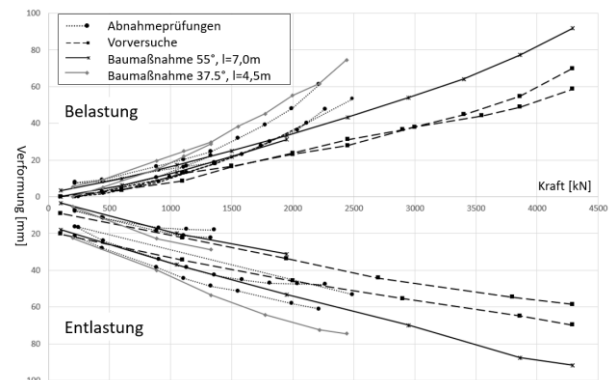


Abbildung 8: Last-Verformungs-Verhalten ausgewählter Düsenstrahlpfähle

Die beobachteten geringen Verformungen in den Versuchen sowie die Ausführungen von Krentz 2015 und Kayser et al 2007 legen nahe, dass die Düsenstrahlpfähle den Widerstand über den Säulenmantel (die Verzahnung) aktivieren und nicht über die Stirnfläche der Düsenstrahlsäule. Dies wurde auch durch Finite-Elemente-Simulationen, unter Anwendung von Plaxis 2D und dem Hardening-Soil-Model, bestätigt (Abbildung 9). Zur Aktivierung des Erdwiderstandes durch die Stirnfläche der Düsenstrahlsäule sind

weit aus größere Verformungen, als die in den Versuchen beobachteten, erforderlich. Die sich bei großen Verformungen ergebenden Spannungsumlagerungen können sich hingegen negativ auf andere Bauteile (Wände, Platte) in Form von Spannungsüberschreitungen auswirken.

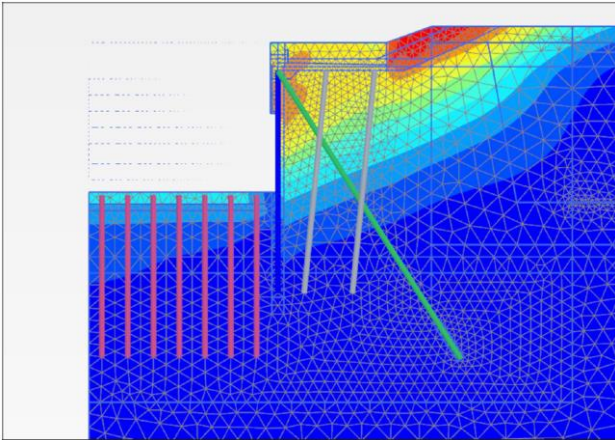


Abbildung 9: FEM-Modell der Kammer (Ausschnitt)

## 6 Nachhaltigkeit bei der Düsenstrahlpfahl-Herstellung

Bei den zuvor beschriebenen Düsenstrahlpfählen liegt der Zementverbrauch bei etwa 2,9 Tonnen je Meter. Bei einem 7,5 m langen Körper bedeutet dies 21,7 Tonnen an Zement. In Anbetracht der mehr als 1000 herzustellenden Düsenstrahlpfähle, wurden Untersuchungen unternommen, um den Verbrauch zu reduzieren. Durch abweichende gerätespezifische Herstellungsparameter, d.h. Düsendurchmesser, Rotations- und Ziehgeschwindigkeit (in verschiedenen Phasen) und der w/z-Werte, konnte der Zementverbrauch um bis zu 40% reduziert werden. Weitere verifizierende Untersuchungen sind noch ausstehend.

## 7 Fazit

Basierend auf umfangreichen Untersuchungen an Düsenstrahlpfählen konnten diese Rückverankerungselemente für den Bau der 5. Schleusenammer in Brunsbüttel empfohlen werden. Im Zuge dessen konnte nachgewiesen werden, dass selbst Zementsuspensionen mit einem w/z-Wert von 0,5 beim Düsenstrahlverfahren anwendbar sind. Durch die ermittelten geeigneten gerätespezifischen Herstellungsparameter konnten in den Vorversuchen die geforderten Geometrien der Düsenstrahlsäulen mit einem Durchmesser von 1,0 m und den geforderten Materialeigenschaften (in Bezug auf das betonangreifende Grundwasser) hergestellt werden.

Bei der eigentlichen Baumaßnahme war eine gerätespezifische Anpassung der Herstellungsparameter

erforderlich, um die gleichen Ergebnisse wie in den Vorversuchen zu erzielen.

In beiden Projektphasen bestätigten Probelastungen die hohe Tragfähigkeit der Düsenstrahlpfähle. Zusätzliche qualitätssichernde Abnahmeprüfungen während der Baumaßnahme selbst, bestätigen eine fachgerechte Ausführung und die gute Tragfähigkeit. Durch die umfassenden Untersuchungen und konservativen Ansätze ist davon auszugehen, dass die Düsenstrahlpfähle in den 100 Jahren Nutzungszeit der 5. Schleusenammer als dauerhaft tragfähiges Rückverankerungselement dienen werden.

## Literaturverzeichnis

- Bautechnik aktuell (2000). *Kajeninstandsetzung im Marinearsenal Kiel*. Bautechnik 77 (9).
- Bergschneider B. (2002). *Zur Reichweite beim Düsenstrahlverfahren im Sand*. Bergische Universität Wuppertal, Fachbereich Bauingenieurwesen, Bodenmechanik und Grundbau, Bericht 24.
- Bregola A. & Roberts B. (2003). *Jet Grout Foundations to Resist Compressive, Uplift and Lateral Loads at an Operational Power Plant*. Third International Conference on Grouting and Ground Treatment.
- Bzówka J. (2012). *Analysis of bearing capacity and settlement of jet grouting columns*. Architecture Civil engineering Environment. 2012 (2), 41-54
- 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.
- EAK (2002). *Empfehlungen für Küstenschutzwerke*. Die Küste, Heft 65.
- Kayser J., Odenwald B., Oltmanns W. (2007). *Herstellung der Baugrube für Schleuse Uelzen II mit dichtender Düsenstrahlsohle*, Tagungsband Johann-Ohde-Kolloquium
- Köster H. & Dietz K. (2006). *Herstellung von Zuggliedern in aggressivem Grundwasser*. Baugrundtagung 2006. DGGT.
- Krentz M. (2015). *Zur guten fachlichen Praxis des Düsenstrahlverfahrens*. Geotechnik 38 (1).
- Kunth F., Ackermann J., Beutel-Scholz A. (2014). *Vorgezogene Pfahlprobelastungen an Düsenstrahlpfählen zum Bau der 5. Schleusenammer in Brunsbüttel*. 33. Baugrundtagung, Tagungsband, DGGT.
- Lu W., Zhao L.Y., Wang K. (2020). *Application and Deformation Control of Pile-anchor Support for Deep Foundation Pit in Soft Soil Area*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 526
- Manassero V. (2017). *An unconventional application of jet grouting to install 4900 kN ground anchors in loose alluvial soil*. Grouting 2017.

Modoni G., Bzówka J., Pieczyrak J. (2010). *Experimental investigation and numerical modelling on the axial loading of jet grouting columns*. Architecture Civil engineering Environment. 2010 (3), 69-78

Pohl M. & Abratis J. (2020). *Planung und Bau der 5. Schleusenkammer in Brunsbüttel*. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt 110, 93-101.

Pohl M., Nuber T., Abratis J., Peschken G. (2020). *Düsenstrahlpfähle für die Schleuse Brunsbüttel unter besonderer Berücksichtigung der GW-Verhältnisse*. Bautechnik 97 (6), 427-432

Rechenberg W. & Sylla H.-M. (1993). *Die Wirkung von Ammonium auf Beton*. Beton 1, S. 26-31

Schulze P. & Pohl M. (2011). *Porenwasserdruckmessungen für den Seeschleusenneubau Brunsbüttel*. BAWKolloquium Geohydraulische Erkundungsverfahren, Tagungsband.

Sondermann W. (2012). *Die Reichweite des Schneidstrahls beim Düsenstrahlverfahren - Einflussfaktoren*. 32. Baugrundtagung, Tagungsband. DGGT.

Stein, J. (2004). *Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Düsenstrahlverfahren*. TUHH, Arbeitsbereich Geotechnik und Baubetrieb, Nr. 8.

Xu H., Chen L., Deng J. (2014). *Uplift test of jet mixing anchor pile*. Soils and Foundation 2014; 54(2), The Japanese Geotechnical Society