

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Pohl, Martin; Böhle, Björn; Eggers, Carmen

Schachtbaugruben für den Ersatzbau Mitteldüker auf der Schleusenanlage Brunsbüttel

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102125>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Pohl, Martin; Böhle, Björn; Eggers, Carmen (2010): Schachtbaugruben für den Ersatzbau Mitteldüker auf der Schleusenanlage Brunsbüttel. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Tiefe Baugruben an Bundeswasserstraßen. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 67-76.

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.



Schachtbaugruben für den Ersatzbau Mitteldüker auf der Schleusenanlage Brunsbüttel

Dr.-Ing. Martin Pohl, Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg, Referat Geotechnik Nord
Dipl.-Ing. Björn Böhle, Brückner Grundbau GmbH, Essen
Dipl.-Ing. Carmen Eggers, Wasser- und Schifffahrtsamt Brunsbüttel

1 Motivation

Die Große (Neue) Schleuse Brunsbüttel wurde im Jahre 1914 dem Verkehr übergeben und ist seither durchgehend im Betrieb. Nach über 90 Jahren Nutzungszeit ist eine Grundinstandsetzung des Massivbaus, Stahlwasserbaus sowie der maschinen- und elektrotechnischen Anlagen zur Aufrechterhaltung der Verkehrs- und Betriebssicherheit dringend erforderlich. Die Standsicherheit wurde im Jahre 2000 von der BAW Karlsruhe, Abteilung Bautechnik untersucht und als nicht gefährdet eingestuft. Der Instandsetzungsbedarf der Schleusenanlage ergibt sich aus Störungen im Betrieb, den Ergebnissen der laufenden Bauwerksinspektionen sowie der langen Standzeit.

In einer Voruntersuchung wurden verschiedene Grundinstandsetzungsvarianten unter Berücksichtigung der Randbedingungen wie z.B. Aufrechterhaltung der Schifffahrt erarbeitet. Die Nutzen-Kosten-Untersuchung warf den höchsten Nutzwert bei einer Grundinstandsetzung der Großen Schleuse mit einem vorgezogenen Neubau einer 5. Schleusenkammer auf der Schleuseninsel zwischen den beiden bestehenden Schleusenanlagen aus. Mit Beauftragung dieser Variante durch den Bundesminister für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung wurde die Baufeldfreimachung als Planungsleistung veranlasst. Im geplanten Baufeld befindet sich die derzeitige Energieversorgung der gesamten Schleusenanlage, die vor Beginn der Maßnahme 5. Schleusenkammer verlegt werden muss. Um die Versorgung der Schleusenanlagen und der Einrichtungen auf dem Schleusengelände zu gewährleisten, ist der Bau einer Rohr- und Kabeltunnelanlage „Ersatzbau Mitteldüker“ zur Aufnahme der Leitungen und Medien im Bereich der Großen Schleuse Brunsbüttel erforderlich (Bild 1).



Bild 1: Schleusenanlage Brunsbüttel mit Mitteldükertrasse

2 Amtsentwurf

Der Amtsentwurf sah eine Unterquerung der bestehenden Schleusenbauwerke in einer Tiefe von NN -31 m mittels eines Rohrvortriebs mit einem Außendurchmesser von 3,0 m bei einer Neigung von 0,5 % vor. Für den Rohrvortrieb und die Anbindung der Schleusenbauwerke an die Energieversorgung wurden insgesamt fünf Schachtbauwerke mit Tiefen bis zu 42 m errichtet.

Die Charakteristika der Schächte sind wie folgt:

- Startschacht südlich der „Kleinen Schleuse“: Durchmesser 10 m, Wandstärke 1,2 m
- Zielschacht nördlich der „Großen Schleuse“: Durchmesser 8 m, Wandstärke 1 m
- 2 Zwischenschächte auf der Schleuseninsel: Durchmesser 6 m, Wandstärke 1 m
- Zwischenschacht auf der Mittelmauer „Große Schleuse“: Durchmesser 1,8 m (Großbohrung)

Die Schächte wurden aus polygonalen Schlitzwandlamellen hergestellt. In den Ein- und Ausfahrbereichen des Rohrvortriebs an den Schächten wurden etwa 3 m starke Dichtkörper mittels HDI aufgedüst. Für den Anschluss des Schachtrohrs des Zwischenschachts auf der Mittelmauer „Große Schleuse“ sollte ein erd- und wasserdruckabschirmender Dichtkörper entweder aus einem Vereisungskörper oder aus überschnittenen frisch-in-frisch hergestellten HDI-Körpern errichtet werden. Letzteres wurde ausgeführt, um im Schutze dieses Dichtkörpers das Schachtrohr an den Rohrstrang anzuschließen.

3 Baugrundgutachten

Zur Baugrunderkundung wurden gekernte Bohrungen in den Schachtmittelpunkten und entlang der Dükertrasse ausgeführt. In den bindigen Bodenschichten wurden alle 2 m ungestörte Proben genommen, um an diesen mittels Triaxial- und Kompressionsversuche die Bodenparameter zu ermitteln. Drucksondierungen konnten aufgrund der großmächtigen weichen bindigen Kleischicht nicht bis zu den geforderten Endtiefen abgeteuft werden. Folglich wurden ergänzende Bohrlochrammsondierungen (BDP) vorgenommen, um auf die Festigkeit der rolligen Böden schließen zu können.

Der anstehende Baugrund lässt sich wie folgt einteilen (Bild 2):

- Klei mit Mächtigkeiten von etwa 20 bis 25 m, überwiegend weicher Konsistenz, aus einer Wechselagerung von Schluff / Ton mit eingelagerten Feinsanden. In einigen Bereichen ist der Klei aufgefüllt, der infolge des Einbaus vergleichsweise homogen (durchmischt) ist.
- Sande mit Kies, überwiegend großer bis sehr großer Festigkeit, bereichsweise auch geringer und mittlerer Festigkeit, den Klei unterlagernd. In dieser Schicht wurden vermehrt Steine und Blöcke erkundet.
- Geschiebemergel steifer bis halbfester Konsistenz, der die Sande mit Kies unterlagert und im Bereich der Kleinen Schleuse auskeilt. Auch in dieser Schicht sind Steine und Blöcke erkundet worden.
- Beckenton steifer bis halbfester Konsistenz, der im Bereich des Zielschachtes in die Sande mit Kies eingelagert ist.

Aufgrund des geringen Abstands der zu unterfahrenden Holzpfahlgruppe vom Rohrvortrieb ($< 1 \cdot D$) sowie des ungewissen baulichen Zustandes und des Traglastverhaltens der aufgehenden Konstruktion, wurde im Baugrundgutachten ein Stützgewölbe unterhalb der Pfahlgruppe gefordert. Dieses wurde aufgrund des in weiten Bereichen anstehenden Feinsandes mittels einer Silikatgelinjektion aus dem Zwischenschacht heraus ausgeführt.

Im Baugrundgutachten wurden hohe Anforderungen an die Vertikalität der Schachtwände gestellt (0,5 bis 1 % der Tiefe), um bei den vergleichsweise hohen Wasserdrücken von bis zu 3,6 bar eine weitgehende Wasserdichtigkeit zu erzielen und keinen Bodenzug zu erlauben. Der letztere Punkt war insbesondere bei dem Zielschacht von Bedeutung, da das Mittelhaupt – bei schlechtem baulichen Zustand - lediglich 8 m von der Schachtwandung entfernt ist.

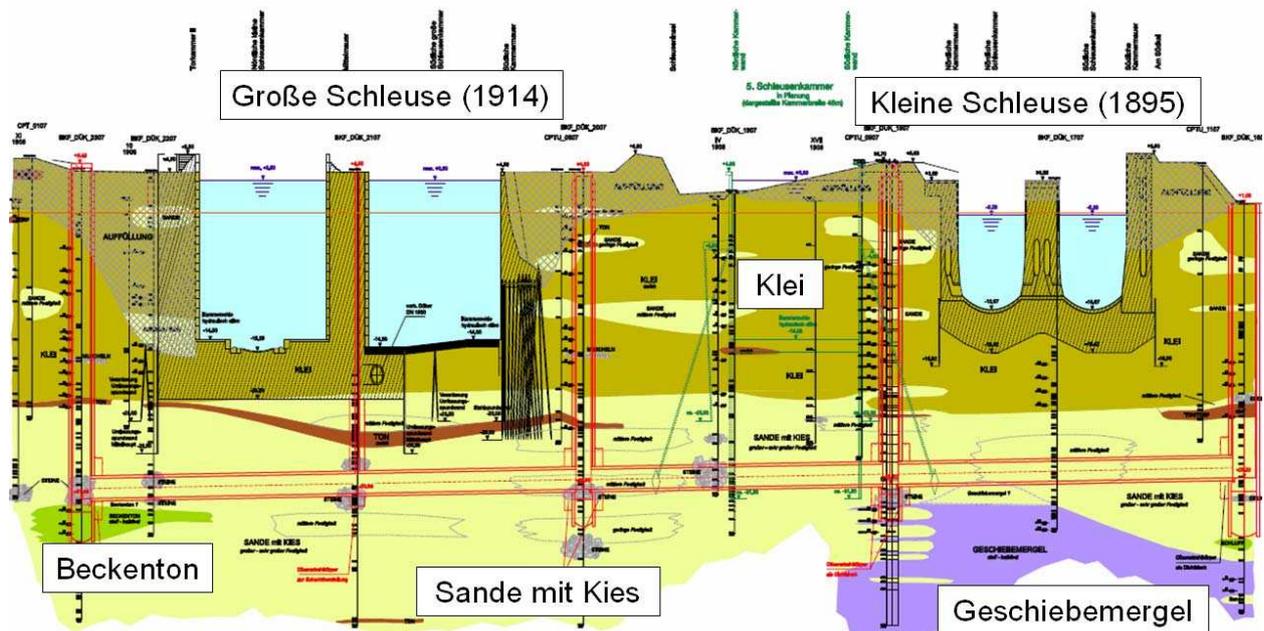


Bild 2: Geotechnischer Längsschnitt entlang der Mitteldükertrasse (überhöht)

4 Porenwasserdruckmessungen

Im Vorwege der Baugrunderkundung für den Ersatzbau Mitteldüker wurden im Rahmen der Beurteilung der Sturmflutsicherheit der Schleusenanlage Bohrungen abgeteuft und in diesen Porenwasserdruckaufnehmer (PWD) in maßgeblichen Bereichen positioniert. Auf Grundlage der Messwerte wurden lastfallabhängige Wasserdruckansätze hergeleitet, die als Bemessungsgrundlage der Schachtbauwerke und des Dükers dienen.

Die Messergebnisse zeigen, dass die Grundwasserstände im Klei von meteorologischen Ereignissen dominiert werden, wohingegen die Grundwasserstände in den Sanden mit Kies tidebeeinflusst sind (Bild 3).

Bei den Schlitzwandarbeiten konnte ein Anstieg der Porenwasserdrücke insbesondere im horizontal stärker durchlässigen Klei festgestellt werden (Bild 3). Bei Baubeginn, d.h. bei den Schlitzwandarbeiten mit Bentonit gestützter Wand, steigen die Porenwasserdrücke im Klei bereits an und erhöhen sich bei den Betonierarbeiten. Über das Wochenende, d.h. bei Arbeitsunterbrechung, klingen die Porenwasserdrücke wieder ab.

Bei den HDI-Arbeiten ist insbesondere in den Sanden mit Kies ein Anstieg der Porenwasserdrücke um etwa 0,2 bar bei den benachbarten PWD festzustellen. Mit gemessenen etwa 0,3 bar bei den benachbarten PWD sind beim Rohrvortrieb bei reiner Druckluftstützung (für Inspektionsarbeiten) die höchsten Porenwasserdrücke in den Sanden mit Kies aufgetreten. Diese ließen sich insbesondere entlang der Trasse messtechnisch erfassen. Die Porenwasserüberdruckanstiege in den Sanden mit Kies entwickeln sich unter dem vertikal gering durchlässigen Klei, da der eingetragene Druck in den Boden nicht nach oben (durch den Klei) entweichen kann. Dies hat in einem Fall zu einem Piping durch den Klei bis an die Geländeoberfläche geführt, d.h. einem Wasser- und Bodenaustrag aus den Sanden mit Kies.

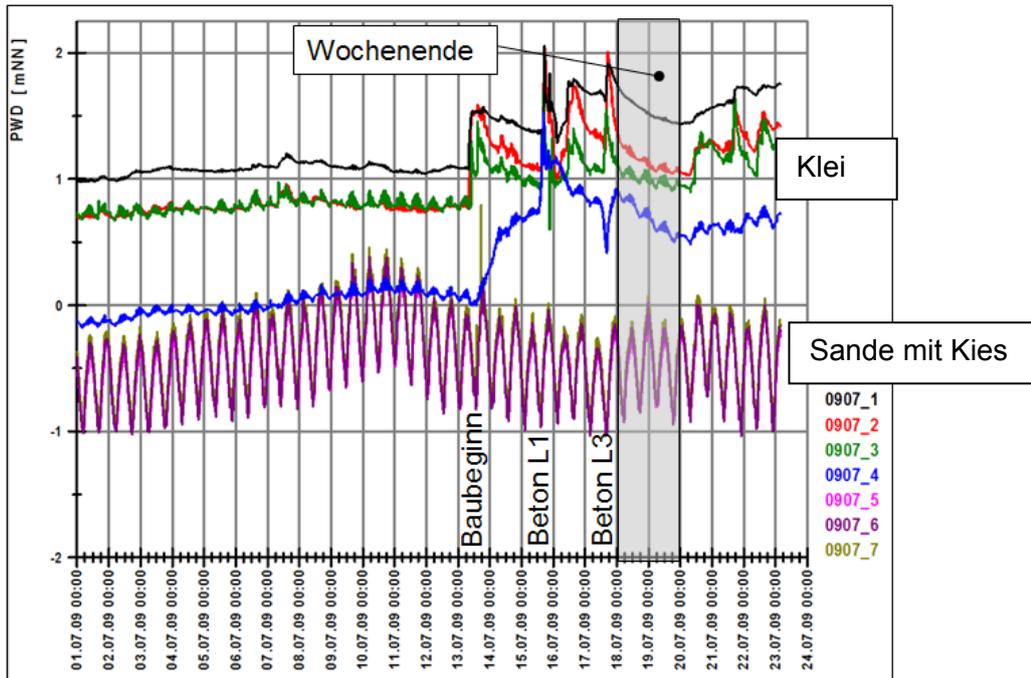


Bild 3: Porenwasserdrücke infolge Schlitzwandarbeiten

5 Ausführung

5.1 Herstellung der Schachtbauwerke

Die bauseitige Empfehlung für die Ausführung der Schachtbauwerke sah Schlitzwände und Bohrpfahlwände vor. Polygonale Schlitzwandenschächte waren am Start- und den beiden Zwischenschächten geplant. Im Bereich des Zielschachtes wurde aufgrund der geometrischen Nähe zum Mittelhaupt des bestehenden Schleusenbauwerkes eine überschnittene Bohrpfahlwand empfohlen. Der Vorteil der Bohrpfahlwand gegenüber der Schlitzwand wurde in einem verminderten Bodenentzug gegenüber der Schlitzwandbauweise gesehen. Dem gegenüber stehen die sich bei der Bohrpfahlherstellung zwangsläufig einstellenden zahlreichen Fugen zwischen benachbarten Pfählen.

Zwischen dem Bauherrn, den Fachplanern und Gutachtern sowie dem ausführenden Unternehmen wurden offen die Vor- und Nachteile der möglichen Verfahren diskutiert und abgewogen. Hierbei wurden neuere Erkenntnisse von Schäfer (2004) zur „Herstellung einer Schlitzwand in weichen Böden“ mit herangezogen. Schäfer kommt für weiche Böden zu dem Schluss, dass während der Schlitzabteufung nur geringfügige Bodenverschiebungen auftreten, die durch den anschließenden Betonvorgang wieder weitgehend kompensiert bzw. sogar überkompensiert werden. Im Zuge der planungs- und baubegleitenden Beratungen wurde beschlossen, die Erkenntnisse aus der Schlitzwandherstellung am Startschacht als Ausgangspunkt für weitere Entscheidungen zur Herstellung des Zielschachtes zu nutzen. Ergänzend wurde ein Untersuchungsprogramm am Zwischenschacht Kleine Schleuse vereinbart, um mögliche Einflüsse auf benachbarte Bauwerke in der Umgebung festzustellen.

5.2 Ausführung der Schlitzwandenschächte

5.2.1 Herstellung des Startschachtes

Die Herstellung der Schlitzwände erfolgte nach DIN EN 1538 und DIN 4126. Für den Startschacht war eine Dicke der Schlitzwand von $d = 1,20$ m auszuführen. Bei einer Aushubtiefe von ca. 41 m waren Lammellenlängen von $l \leq 6,80$ m vorgesehen. Als Abschalsystem wurden verlorene Stahlfugen eingesetzt. Die Herstellung erfolgte mit Anfänger-, Läufer- (Standard) und Schließerlamellen.

Projektbezogen galten über die Anforderungen der DIN 4126 hinausgehende Anforderungen an die Vertikalität der Lamellen (vertikal in x- und y-Richtung $< 0,5\%$ der Wandtiefe). Relevant war hierbei nach statischen und hydraulischen Erfordernissen die Höhenlage der späteren Unterwasserbetonsohle bei $t_{UWS} = 35$ m. Ziel dieser erhöhten Anforderung war die Sicherstellung der Wasserdichtigkeit und der statischen erforderlichen Druckringdicke der Schlitzwand.

Nach Erreichen der Endteufe der einzelnen Stiche wurde die Lagegenauigkeit mit dem System Jean Lutz Taraben vermessen. Um die Anforderungen an die Ausbildung des Druckringes und der Sicherstellung der Wasserdichtigkeit zu gewährleisten, wurde ein neuartiges zwangsgeführtes Fugensystem eingeführt und schrittweise optimiert. Hierbei ist in den Bewehrungskorb ein Stahlprofil integriert, welches sowohl als Führungselement als auch zusätzliches Dichtelement fungiert (siehe Bild 4).



Bild 4: Bewehrungskorb mit Fugenkonstruktion und Fugenklaue am Meißel

Ein mit einer Fugenklaue ausgestatteter Putzmeißel ermöglichte es während des Aushubes, den Anschluss an das Fugenelement zwangsgeführt bis zur Endteufe zu reinigen. Das zwangsgeführte Putzen stellt gegenüber dem frei geführten Putzen einen erheblichen Vorteil dar und wurde erstmalig bis in große Teufen eingesetzt.

Die Lage der einzelnen Lamellen auf Höhe der Unterwasserbetonsohle ist in Bild 5 gegeben. Wie aus der Darstellung ersichtlich ist, konnte bereits im Anschluss an die Schlitzwandherstellung von integrieren Fugenübergängen – und somit einem geschlossenen Druckring – ausgegangen werden.

Im Zuge des Aushubes wurden die Messergebnisse vollauf bestätigt. Es zeigte sich jedoch, dass ein Fugenbereich mittels Injektion nachzudichten war. Insgesamt kann dem neu entwickelten System bescheinigt werden, dass es erheblich dazu beigetragen hat, das Sicherheitsniveau der bei diesen großen Ausführungstiefen und den sich als unvermeidbar ergebenden Toleranzen stets als kritisch anzusehenden Schlitzwandfugen zu erhöhen.

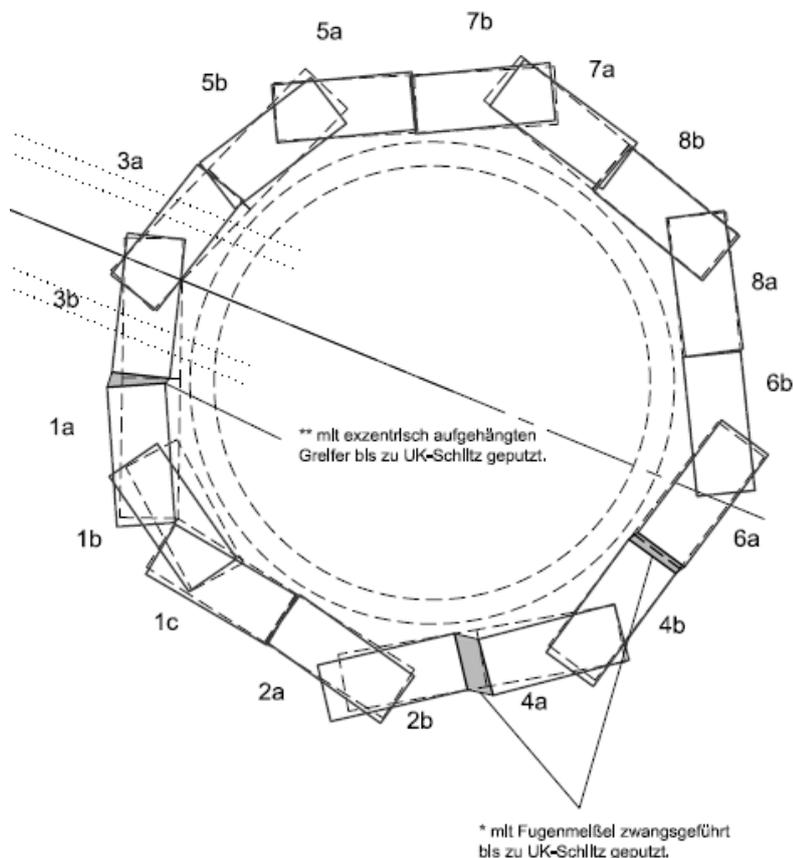


Bild 5: Darstellung der Schlitzwandlamellen in 35 m Tiefe

5.2.2 Messprogramm am Zwischen- und Zielschacht

Die bei der Herstellung des Startschachtes gewonnenen Erkenntnisse erlaubten positive Folgerungen für die Ausführung des Zielschachtes in Schlitzwandbauweise, die durch ein Messprogramm am Zwischenschacht Kleine Schleuse verifiziert werden sollten.

Das Messprogramm enthielt Messungen der horizontalen und vertikalen Verschiebungen im Untergrund während der Herstellung der Schlitzwände. Hierzu wurden Inklinometer und Extensometer in unterschiedlichen Entfernungen zu den Lamellen installiert und mit diesen während der einzelnen Herstellungsphasen detaillierte Messungen durchgeführt.

Der erste Messquerschnitt ca. 6,5 m vor der Anfängerlamelle ADr1 besteht aus dem Inklinometer I1 und einem Dreifach-Extensometer. Der zweite Messquerschnitt mit einem Inklinometer I2 liegt ca. 2m vor der Außenfläche der Lamelle LD3 entfernt. Die Extensometer wurden in verschiedenen Bodenschichten abgesetzt (siehe Bild 6).

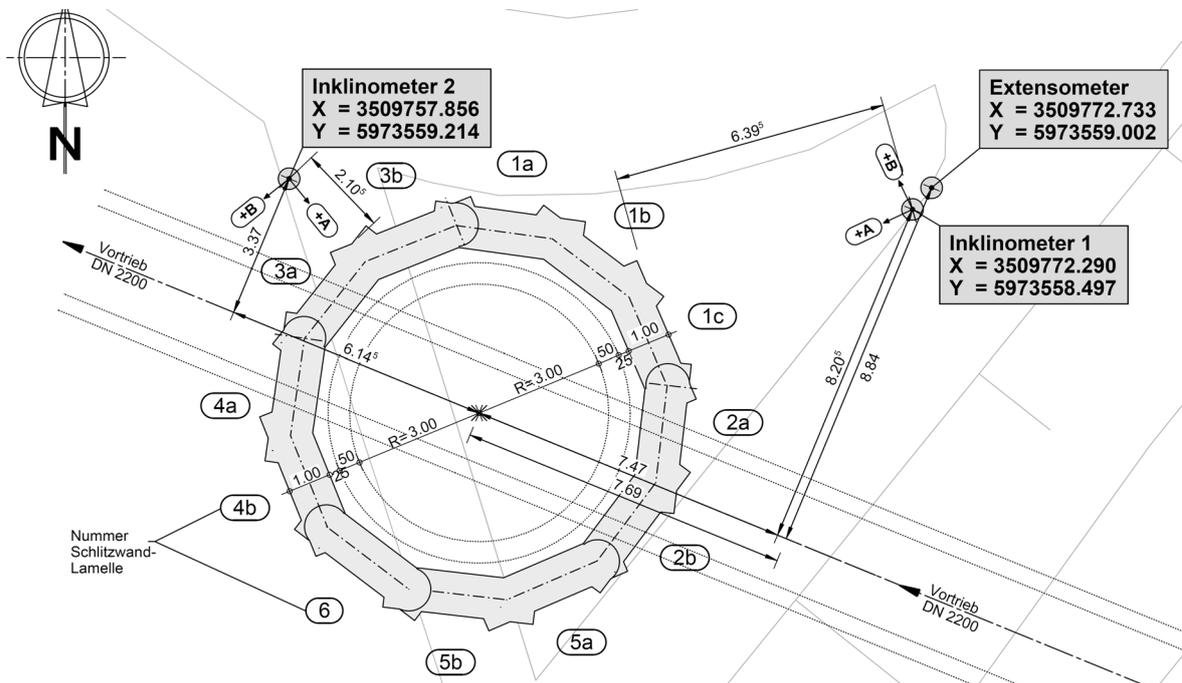


Bild 6: Zwischenschacht Kleine Schleuse: Lamelleneinteilung

5.2.3 Messergebnisse Extensometer

Nach der Nullmessung wurden insgesamt 16 Folgemessungen ausgeführt. Die Messergebnisse sind in Bild 7 aufgetragen. Die Setzungen vor Betonage der Anfängerlamelle erreichten maximal 0,2 mm, die nach Betonage 0,8 mm. Infolge Herstellung der benachbarten Läuferlamelle 3 ergaben sich keine zusätzlichen Setzungen. Infolge Tidenhub und Schleusungsvorgängen sind vertikale Bewegungen von 0,1 bis 0,2 mm zu vermuten. Im Ergebnis ist somit davon auszugehen, dass durch die Schlitzwandherstellung keine signifikanten Setzungen hervorgerufen wurden.

5.2.4 Messdaten am Beispiel Inklinometer 1

Nach der Nullmessung wurden 17 Folgemessungen durchgeführt. Die Messdaten sind in Bild 8 aufgetragen. Die Messungen 1 bis 11 erfolgten aushubbegleitend bis zum Zeitpunkt vor Betonage der Anfängerlamelle ADR1. Die Messungen 12 bis 17 zeigen die horizontalen Verformungen nach deren Betonage und Herstellung der Läuferlamelle 3. Parallele Messungen der BAW an benachbarten Porenwasserdruckmessgebern bestätigten deutlich die Druckzunahme während der Betonage (Bild 3). Selbst während des Aushubes der Lamellen waren leichte Druckerhöhungen ablesbar.

Die maximalen Auslenkungen lagen bei $s_h < 1,5$ mm. Somit ergeben sich in dieser Entfernung zum Schlitz keine nennenswerten oder ein Bauwerk beeinflussenden horizontalen Verformungen.

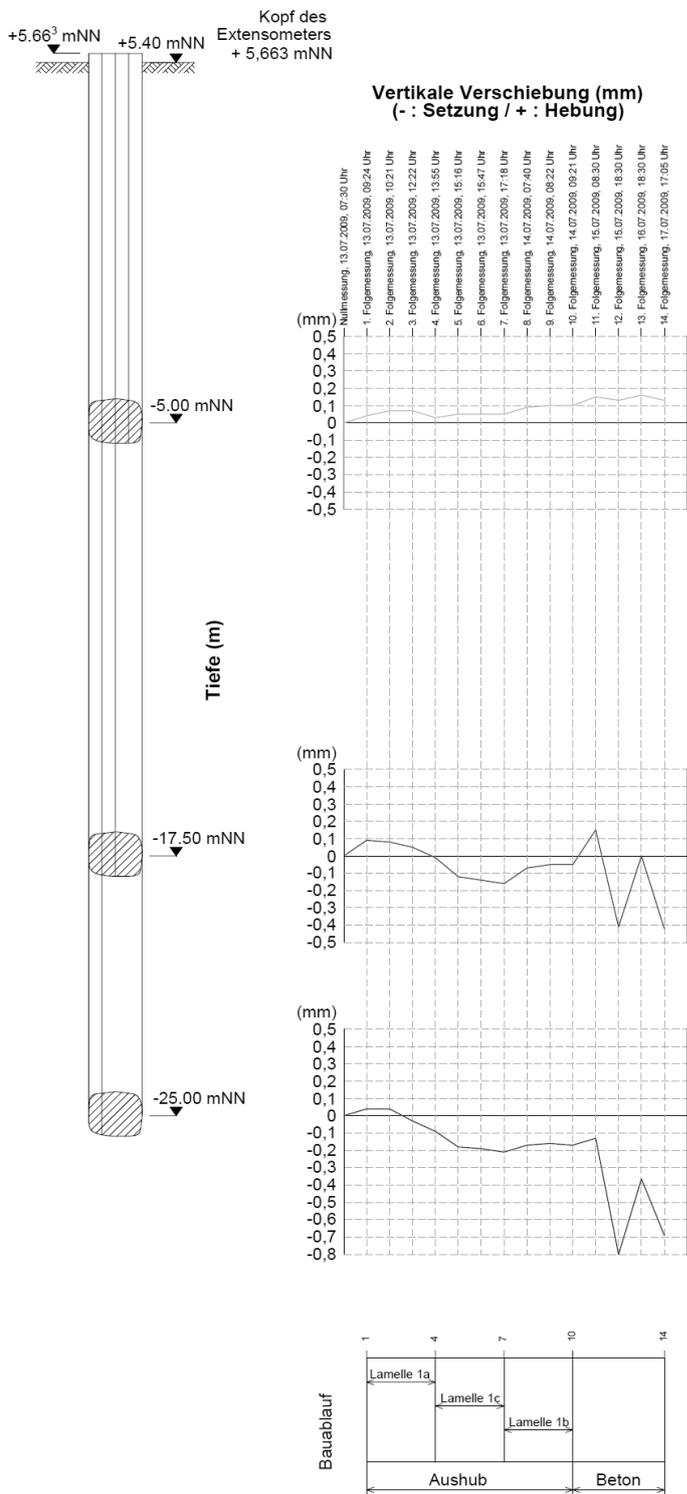


Bild 7: Messdaten Extensometer

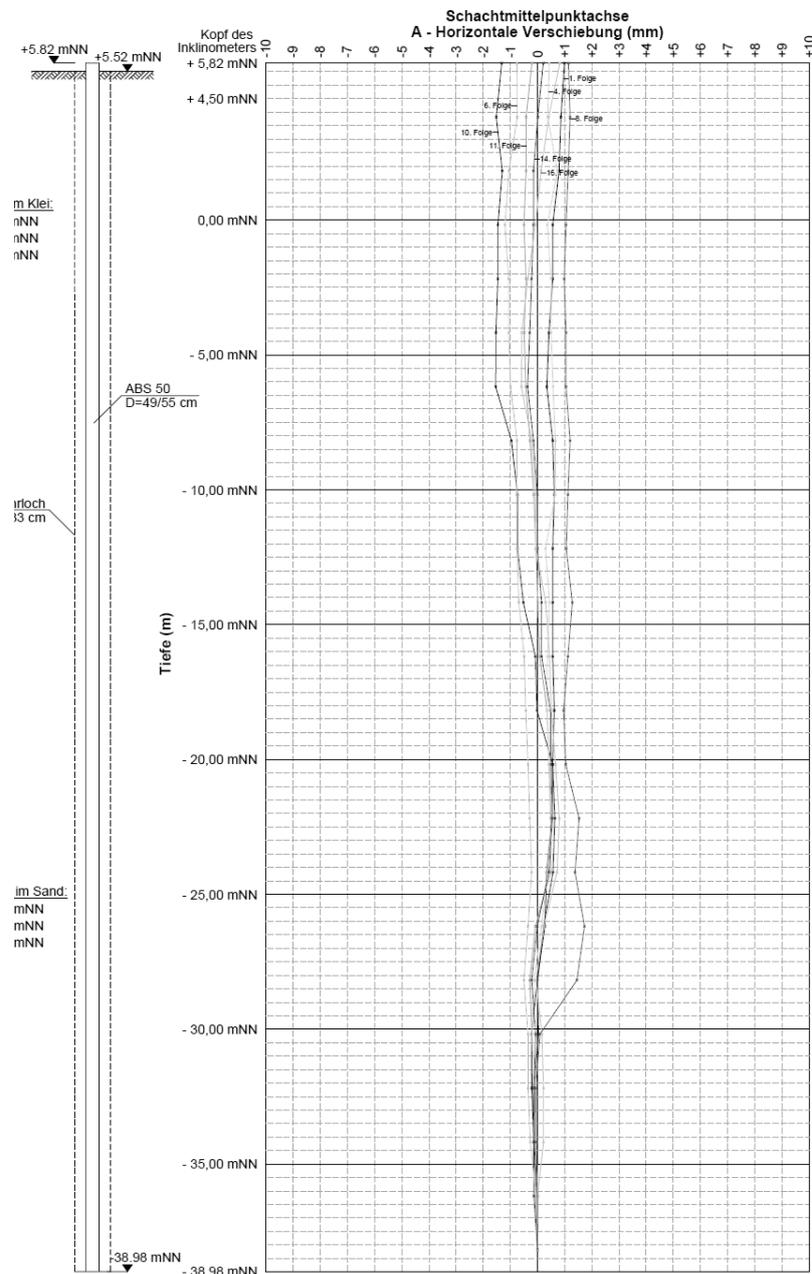


Bild 8: Messdaten Inclinometer 1

5.3 Düsenstrahlarbeiten

An allen Baugruben waren vor den Einfahr- und Durchfahrbereichen Dichtblöcke im Düsenstrahlverfahren (DSV) herzustellen. Die Kubatur eines Dichtblocks beträgt bei einer Höhe von 7 m und einer Grundrissfläche von 7 m x ca. 3m jeweils ca. 147 m³. Von Start- zu Zielschacht waren infolge des Gefälles Bohrtiefen von ca. 34 m bis ca. 40 m Tiefe bis zur Unterkante der Dichtblöcke erforderlich.

Auf der flach gegründeten Mittelmauer der Großen Schleuse war ein Anschlusschacht an den Düker herzustellen. Für den Anschluss des Schachtrohres an den Düker erfolgten die Stabilisierung des umgebenden Bodens und die Abschirmung des Erddruckes durch einen Düsenstrahlkörper von der Unterkante

der Mittelmauer bis ca. 2 m unterhalb des Rohrvortriebs. Der Durchmesser der Düsenstrahlsäulen war hier auf 1,50 m begrenzt.

Die gemäß Baubeschreibung und Leistungsverzeichnis geforderte Druckfestigkeit betrug 2 - 5 MN/m², die Durchlässigkeit $k_f \leq 10^{-6}$ m/s.

Vor Beginn der Arbeiten wurden die Herstellparameter und Abmessungen der Düsenstrahlsäulen im Bereich des Startschachtes in einem Probefeld mit charakteristischem Bodenaufbau verifiziert. Die Reichweitenbestimmungen erfolgten durch In-situ-Messungen, zusätzliches Abteufen von Bohrungen in unterschiedlichen Abständen zur Säulenachse (Tastbohrungen) und Kernbohrungen an den Probesäulen.

Für die Herstellung der Dichtblöcke vor den Schächten kam das Verfahren 3 – Hochdruckschneiden mit Bindemittelsuspension und Luftummantelung des Schneidstrahls – der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung „Düsenstrahlverfahren Brückner“ zur Anwendung. Unter der Mittelmauer wurde nach Verfahren 1, ohne Luftummantelung, gearbeitet.

Auf Grundlage der Ergebnisse des Probefeldes wurden die Herstellparameter und das Bohrraster festgelegt. Im Bereich des Ein- und Ausfahrbereiches der Schächte wurden Bauwerkssäulen mit einem Säulendurchmesser von D = 2,60 m ausgeführt.

Die Bohr- und Düsarbeiten erfolgten mit einem Bohrgerät, das mit einer Mätklerhöhe von ca. 32 m den Bohrstrang mit einmaligem Gestängenachsetzen auf Endteufe bringen konnte. Jede Bohrung wurde tachymetrisch eingemessen und zum Zwecke der Lagebestimmung der ausgeführten Säule die Vertikalität mit einer Inklinometerkette gemessen. Die Prozessdatenerfassung für den Bohr- und Jetvorgang wurde im Bohrgerät auf Speicherkarte mitgeschrieben und im Baustellenbüro ausgewertet.

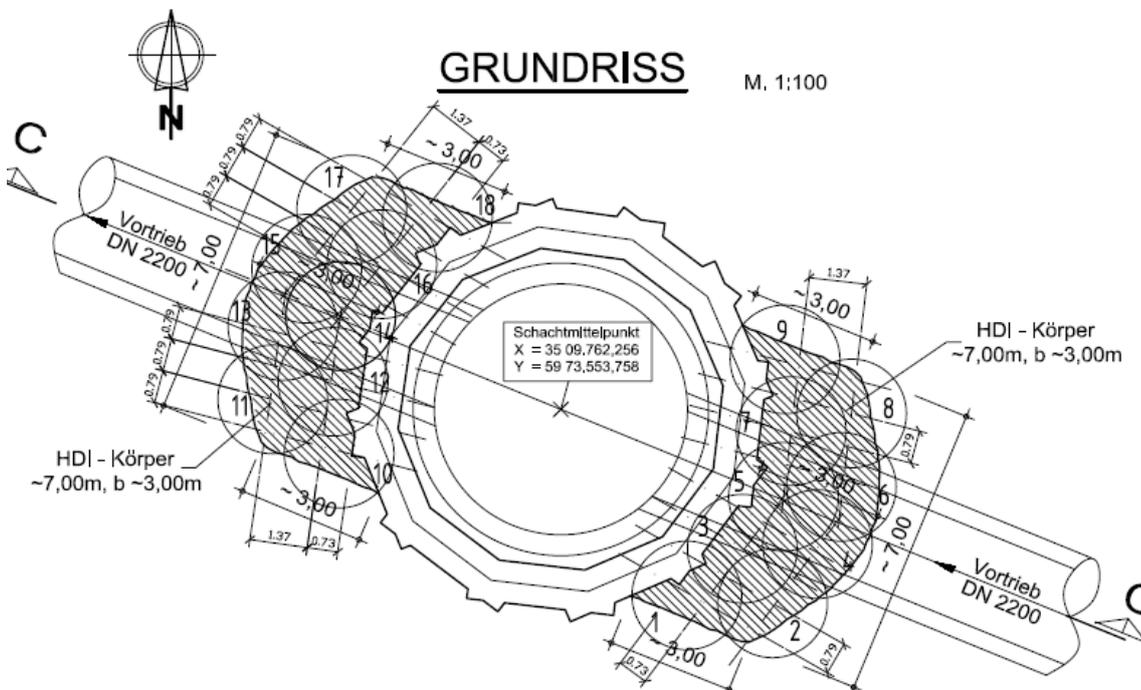


Bild 9: Dichtblöcke am Zwischenschacht Kleine Schleuse