

---

# Rubrik: Baugruben und Tunnelbau in offener Bauweise

---

## I. Gesteuertes Bohren für das Düsenstrahlverfahren

Nikolaus Schneider und Silke Appel

### Zusammenfassung

*Die Düsenstrahltechnik hat durch den Einbau von Neigungssensoren in das Düsenstrahlgestänge eine grundsätzliche Verbesserung erfahren, die die Ausführungssicherheit, insbesondere beim Einsatz des Verfahrens zu Abdichtungszwecken, deutlich erhöht und in Kombination mit Körperschallmessungen neue Möglichkeiten der Qualitätssicherung eröffnet. Die Einleitung von elektrischer Spannung in das Bohrgestänge ermöglicht eine Datenauslesung aus den Neigungssensoren in Echtzeit und damit eine gezielte Steuerung der Bohrung. Aus den digitalisierten Signalen von Körperschallmessungen in ausgehärteten Säulen sind darüber hinaus Rückschlüsse auf die Überschneidung der Düsenstrahlsäulen nach objektiven Kriterien möglich. Dies bringt eine erhebliche Vergrößerung der Ausführungssicherheit für Dichtsohlen mit sich.*

### Rubrik: Baugruben und Tunnelbau in offener Bauweise

*Jet grouting technology has experienced fundamental improvements through the installation of inclination sensors in the jetting rod, which significantly increases the reliability of construction work, especially when constructing water tight sealing layers. Reading structure borne noise in jet grouted structures opens new possibilities for quality assurance. Inducing electrical voltage into the jetting rod enables data to be read from the inclination sensors in real time and thus measuring the drilling direction while drilling. Evaluating the digitized signals from structure-borne sound measurements in hardened columns, conclusions can also be drawn in regard to the overlap of the jet grouted columns according to objective criteria, which significantly increases the reliability of the execution of sealing layers.*

## **1 Grundsätzliche Verbesserungen der Düsenstrahltechnik**

### **1.1 Anwendung der Düsenstrahltechnik im Tunnelbau**

Die innerstädtischen Infrastrukturprojekte der letzten Jahrzehnte belegen die Notwendigkeit von unterstützenden Spezialtiefbaumaßnahmen, die beispielsweise für die Realisierung von U- und S-Bahn-Linien erforderlich sind. Tiefe Baugruben als Start- und Zielschächte für Tunnelbohrmaschinen sind wichtige Meilensteine der Projektrealisierung. Um den besonderen Herausforderungen bei der Planung und den Ausführungen einer tiefen Baugrube in zentraler Innenstadtlage gerecht zu werden, wird auf eine breite Palette von Spezialtiefbaugewerken zurückgegriffen.

Die Sicherung von tiefen Baugruben in unmittelbarer Nähe zu Bestandsgebäuden, häufig auch im Anschluss an vorhandene U-Bahn-Linien, verdeutlicht die vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten des Düsenstrahlverfahrens, das gerade unter beengten Platzverhältnissen mit Gewinn für das Projekt eingesetzt werden kann.

Das Düsenstrahlverfahren hat seit seiner Einführung insbesondere in den letzten Jahren eine systematische Weiterentwicklung erfahren, die in diesem Artikel beschrieben wird. Eine Schlüsseltechnik ist hierbei die Verbesserung des Düsenstrahlgestänges durch den Einbau von Neigungssensoren und damit die funktionale Erweiterung als Ketteninklinometer („Richtungsgestänge“) in Verbindung mit ausführungsbegleitenden Körperschallmessungen in ausgehärteten Düsenstrahlkörpern.

### **1.2 Stand der Technik**

Das Düsenstrahlverfahren (DSV) wurde in den 1980er-Jahren in Deutschland eingeführt, um u. a. Gebäude auch bei hohen Grundwasserständen verformungsarm zu unterfangen. Die Ausführung der Düsenstrahlarbeiten erfolgte unter den Auflagen einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung, die vom Deutschen Institut für Bautechnik ausgestellt wurde. Nach heutigem Standard werden die Düsenstrahlarbeiten in Anlehnung an die DIN EN 12716-2019-03 [1] ausgeführt. Heute noch gängige Bezeichnungen wie HDI- (Hochdruckinjektions-)

oder Soilcrete-Verfahren wurden damals eingeführt, um dem Düsenstrahlverfahren ein firmenspezifisches Alleinstellungsmerkmal zu verleihen.

Das Düsenstrahlverfahren unterscheidet sich von dem Injektionsverfahren nach DIN EN 12715-2021-01 [2] dadurch, dass mit einem energiereichen Düsenstrahl der anstehende Boden verwirbelt, erodiert und mit Zementsuspension vermischt wird, anstatt das Porenvolumen mit Injektionsgut zu verfüllen (Bild 1).

Der Düsenstrahl wird entweder aus Zementsuspension oder aus Wasser erzeugt, abhängig von den anstehenden Baugrundverhältnissen. Zur Unterstützung der Wirkungsweise des Düsenstrahls kann optional Luft hinzugefügt werden. Dadurch wird die Reibung zwischen dem Hochdruckstrahl und dem anstehenden Boden reduziert und die Reichweite des Düsenstrahls vergrößert. Wenn der Düsenstrahl aus Wasser besteht, wird in der Regel die Zementsuspension tiefenmäßig versetzt über eine Verfülldüse zugegeben; damit wird der Schneidprozess vom Verfüllungsprozess getrennt. Diese räumliche Trennung lehnt sich an das Kontraktor-Verfahren an, um damit über die schwerere Zementsuspension das leichtere Schneidmaterial aus dem Erosionskörper zu verdrängen.

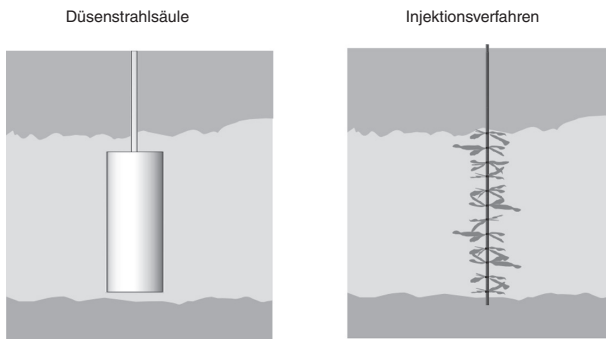


Bild 1. a) Düsenstrahlkörper und b) Injektionskörper.



Der Einsatz von Luft beim Düsenstrahl, insbesondere bei der Unterfangung von bestehenden Gebäuden, wird in der Regel vermieden, da durch die unterstützende Druckluft unerwünschte Hebungerscheinungen am Kellerfußboden nicht ausgeschlossen sind. Zudem ist zu berücksichtigen, dass bei hoher Luftmenge die Expansion des eingesetzten Luftvolumens zu einer bemessungsrelevanten Baugrundumlagerung beiträgt. Die geotechnisch erkundeten und bodenmechanisch bestätigten Baugrundeigenschaften können sich durch den Einsatz der Druckluft verändern.

Mögliche Anwendungsformen der Düsenstrahltechnik sind:

- Gebäudeunterfangungen;
- Nachgründungen von bestehenden Fundamenten;
- Lückenschluss für Baugrubenumschließungen;
- Nachdichtungen von Dämmen;
- Hoch- und tiefliegende Düsenstrahlsohlen.

Der Hochdruckstrahl tritt seitlich am Düsmonitor aus, der an das Düsenstrahlgestänge geschraubt ist (Bild 2).

Die Baustelleneinrichtung für Düsenstrahlarbeiten umfasst mindestens eine Hochdruckpumpe, Silos zur Aufnahme des Zements, die



**Bild 2.** Hochdruckstrahl am Austritt des Düsenstrahlgestänges.

Mischanlage, den Zwischenspeicher, das Bohrgerät, die Schlauchpumpe und das Auffangbecken bzw. den Auffangcontainer. Für eine eventuelle Wiederverwendung der Rücklaufsuspension werden darüber hinaus Separieranlagen verwendet.

Der statisch erforderliche Düsenstrahlkörper setzt sich aus Einzelsäulen zusammen, woraus sich die vorgegebene Gesamtkubatur des Düsenkörpers ergibt. Da aufgrund der nur annähernd bekannten Baugrundeigenschaften eine mathematisch-analytische Vorhersage der Geometrie von Düsenstrahlsäulen in unterschiedlichen Dühorizonten nicht möglich ist, werden in der Regel Probesäulen hergestellt, um den Durchmesser und die mechanischen Druckfestigkeiten zu bestimmen. Im Zuge des Düsens werden relevante Ausführungsparameter wie Ziehzeit, Umdrehungszeit, Suspensionsvolumen, Suspensionsdruck und Luftdruck aufgezeichnet und dem nachgewiesenen Durchmesser der Düsenstrahlsäule mit seiner Druckfestigkeit in der relevanten Ausführungstiefe zugeordnet.

Der Nachweis der qualitätskonformen Ausführung wird dann über die aufgezeichneten Parameter geführt, die mit denen der Probesäulenherstellung verglichen werden.

Diese Parameter sollen während der Ausführung der Bauwerkssäulen eingehalten werden. Dies setzt voraus, dass die Düsenstrahlsäulen in einem erosionsstabilen Horizont hergestellt werden und damit der Düserfolg wiederholbar ist. Darüber hinaus ist sicherzustellen, dass vom Verschleiß betroffene Bauteile wie die Hochdruckdüsen regelmäßig überprüft und ausgetauscht werden. Weitere verfahrensrelevante Hinweise sind in [3] und [4] enthalten. Bild 3 zeigt beispielhaft freigelegte Probesäulen im Sand.

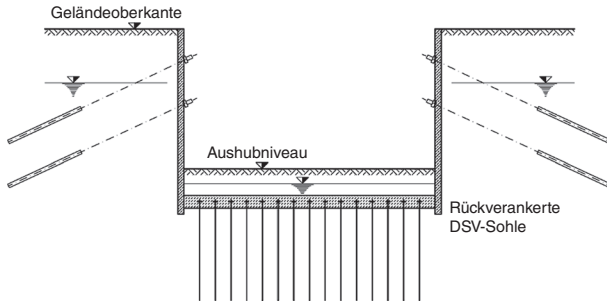
Mit zunehmender Tiefe des Dühorizonts gewinnt die Bohrabweichung an Bedeutung, da nicht nur die Einhaltung der in den Probesäulen bestätigten Parameter, sondern auch die tatsächliche Lage im Untergrund bzw. relativ zu den benachbarten Säulen für die qualitätskonforme Ausführung relevant ist.

Ohne den Nachweis der tatsächlichen Bohrabweichung kann daher eine qualitätskonforme Ausführung der DSV-Arbeiten nicht

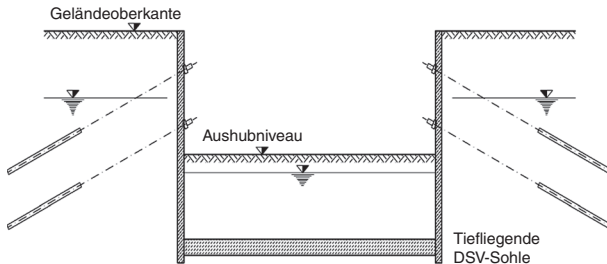


**Bild 3.** Freigelegte Probesäulen im Düsenstrahlverfahren.

gewährleistet werden. Dies ist insbesondere deshalb wichtig, da Düsenstrahlsohlen, ob hoch- oder tiefliegend, einen wasserdichten



**Bild 4.** Hochliegende rückverankerte Düsenstrahlsohle.



**Bild 5.** Tiefliegende auftriebssichere Düsenstrahlsohle.

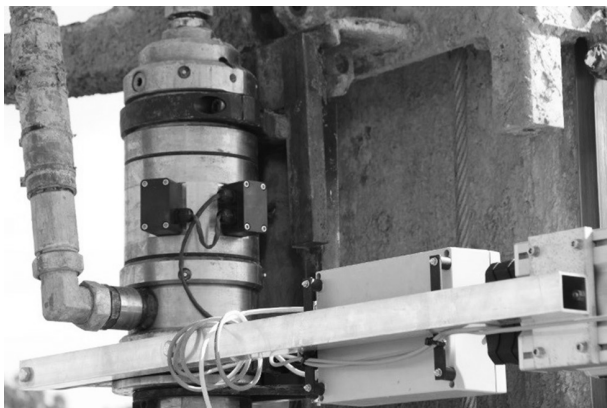
Abschluss der Baugrubenkonstruktion gegenüber dem anstehenden Grundwasser bilden und über Probeabsenkungen in situ getestet werden (vergleiche Bild 4 und Bild 5). Aktuell werden z. B. Düsenstrahlsohlen in 29 m Bohrtiefe gegen 16 m Wasserdruckdifferenz eingesetzt. Werden bei den behördlich vorgeschriebenen Probeabsenkungen unzulässig hohe Zuflussraten festgestellt, so gestaltet sich die Ortung und Sanierung möglicher Leckagen als zeit- und kostenintensive Maßnahme, die meistens auf dem zeitlich kritischen Weg liegt, da ein Baugrubenaushub dadurch verzögert wird.

Das Düsenstrahlverfahren wurde in den letzten Jahren durch innovative Verbesserungen des Düsenstrahlgestänges, der Bohrgeräte und der Auswertung von gemessenem Körperschall in ausgehärteten Säulen signifikant vorangebracht. Die Innovationen haben weitreichende Auswirkungen auf die Qualitätssicherung von Düsenstrahlsohlen und die Vermessung von Probesäulen im Düsenstrahlverfahren (DSV).

## **2 Das Richtungsgestänge**

### **2.1 Einbau von Neigungssensoren in das Düsenstrahlgestänge**

Der entscheidende Schritt für die Verbesserung des Düsenstrahlgestänges ist die Einleitung von Strom aus der Betriebsspannung des Bohrgeräts in das Düsenstrahlgestänge. Die Einleitung der Betriebsspannung in das Bohrgestänge erfolgt über den Spülkopf, der spezielle Kontaktpunkte aufweist. An diesen wird die elektrische Spannung über Schleifkontakte in das drehende Gestänge eingeleitet und an einem Spiegelpunkt wieder aufgenommen (Bild 6). Der Spülkopf wurde



**Bild 6.** Einleitung der elektrischen Spannung in den Spülkopf.

nach den Konstruktionsvorgaben von GuD Consult umkonstruiert und mit einem Drehwinkelgeber aufgerüstet.

Kennzeichnend für das sogenannte Richtungsgestänge ist die maßgeschneiderte Aufrüstung der Einzelgestänge mit zweiachsigen Neigungssensoren, die das Düsenstrahlgestänge funktional in ein Ketteninklinometer verwandeln.

Die elektrische Verbindung der Einzelgestänge mit je zwei Neigungssensoren erzeugt einen durchgehenden Daten- und Energiefluss und schafft die Voraussetzungen dafür, die Auslesung der Daten in Echtzeit („measurement-while drilling“) vorzunehmen. Mit dieser Aufrüstung des Düsenstrahlgestänges kann der Bohrlochverlauf bereits während der Bohrung visualisiert und interpretiert werden.

Dies erfolgt unter Beibehaltung der baupraktisch eingeführten und bewährten Verschraubung der Gestänge untereinander. Der Übergang zwischen den Einzelschüssen wurde technisch durch die in jedem Gestänge integrierten Kupplungen gelöst, die wiederum Neigungssensoren beinhalten. Im Zentrum des Düsenstrahlgestänges wird der Hochdruckkanal geführt, während im Außenkanal die Druckluft strömt. In diesem Außenkanal ist das Datenkabel eingebaut, das die Neigungssensoren mit Strom versorgt und die aufgenommenen Daten überträgt.

Der elektrische Kontakt der Gestänge untereinander erfolgt über Bügel, die im Düsenstrahlgestänge eingebaut sind (Bild 7). Bei Verschraubung der Rohre untereinander schieben sich die Bügel auf die Kontaktflächen des Folgegestänges (Bild 8). Bei der Neukonstruktion des Richtungsgestänges wurden die Kontaktbügel so geplant, dass sie mechanisch durch das Außenrohr geschützt sind (Bild 9).

Entscheidend für die richtige Addition der gemessenen Neigungen ist die Orientierung der einzelnen Gestängeeinheiten zueinander, die über die Referenz der Biegelinie nach dem Aufziehen des Gestänges kalibriert werden. Die Position der Gestänge zueinander ist dann bekannt und kann auf diese Weise während der Ausführung beibehalten werden, solange das Gestänge nicht auseinandergeschraubt wird.



**Bild 7.** Kontaktlose Kupplungen im Düsenstrahlgestänge.



**Bild 8.** Kontaktleitende Kupplungen im Düsenstrahlgestänge.

Entscheidend für die Anwendung des Richtungsgestänges ist ein Bohrgerät, das die planmäßige Bohrtiefe in einem „Satz“ aufnehmen kann. Hierdurch wird der Bohrvorgang in einem Arbeitsprozess durchgeführt, ohne dass das Gestänge immer wieder neu verschraubt



**Bild 9.** Kontaktbügel der Kupplungen im Düsenstrahlgestänge.


werden muss. Diese Monoblock-Ausführung erfordert große Bohrgeräte mit hohen Mäklern, die den Gestängesatz für die Bohrtiefe in voller Länge aufnehmen können. Die Leistungsfähigkeit des Richtungsgestänges zeigt sich in der Gleichzeitigkeit der Auslesung aller Sensoren zu jedem gewünschten Zeitpunkt.

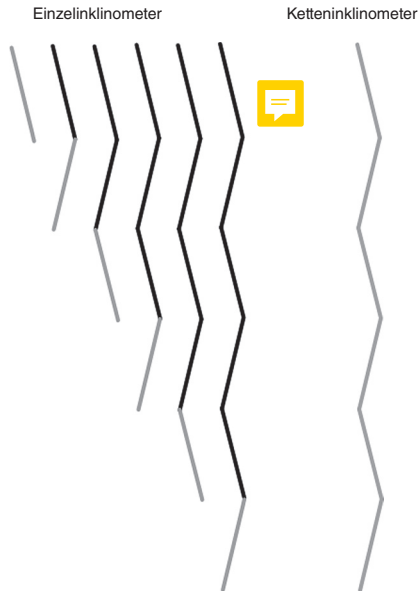
Der Bohrlochverlauf wird dann nicht polygonzugartig in sukzessiver Folge aufgebaut, sondern kann durch gleichzeitige Abfrage aller Sensoren parallel erfasst werden.

Die Aufrüstung aller Gestängeschüsse mit Neigungssensoren ermöglicht die Datenauswertung der Neigungsgeber bereits während des Bohrens und verwandelt das Düsenstrahlgestänge in ein Ketteninklinometer (Bild 10). Von besonderer Bedeutung ist dabei die bi-direktionale Datenleitung, die die Sensoren miteinander verbindet und mit Spannung versorgt. Damit werden die Voraussetzungen für die Visualisierung der Bohrabweichungen noch während des Bohrvorgangs geschaffen.

## 2.2 Aufrüstungen am Bohrgerät

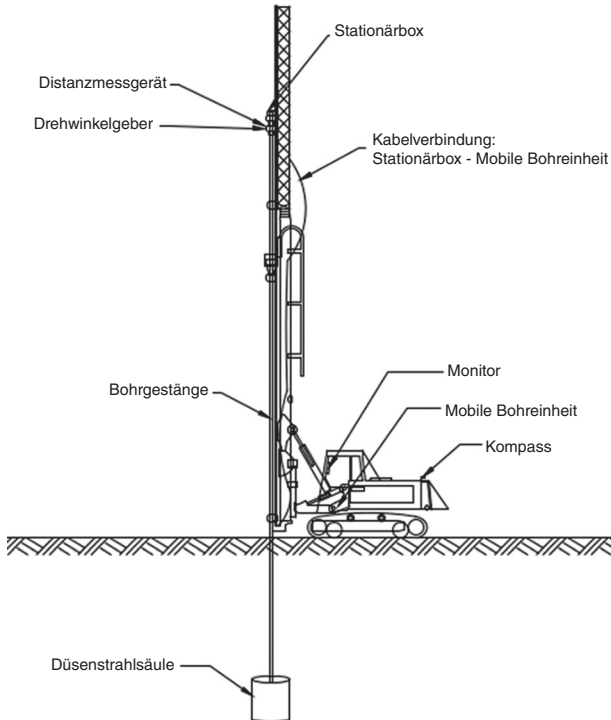
Die Implementierung des Richtungsgestänges setzt zusätzliche Anbauten am Bohrgerät voraus, die die Daten aus dem Richtungsgestänge aufnehmen, zuordnen und auf Nordrichtung orientieren (Bild 11).

Der Drehwinkelgeber im Spüll  erfasst die Position des Düsenstrahlgestänges in Relation zum Bohrgerät. Die ergänzende Ausrichtung des Düsenstrahlgestänges nach Norden erfolgt über den Kompass, der am Bohrgerät montiert ist. Die Gestänge wurden untereinander über die Biegelinie kalibriert, nachdem sie verschraubt wurden. Diese Anordnungen zur Positionserfassung



**Bild 10.** Sukzessive und simultane Bohrlocherfassung.

weisen eine hohe Sicherheit in der räumlichen Lageausrichtung aus, da die Richtung oberirdisch aufgenommen wird. Mögliche Fehler aus ferromagnetischen Einflüssen sind erkennbar, jedoch überschaubar gering.



**Bild 11.** Zusätzliche Anbauten am Bohrerät.



Bild 12. Monitor in der Fahrerkabine.

Um die Bohrlochverläufe unabhängig von der bohrmaschineneigenen Software aufzunehmen, wurde zusätzlich ein Tiefenmesser zur Erfassung der Bohrtiefe angebaut.

Der Monitor in der Fahrerkabine zeigt den aufgenommenen Bohrlochverlauf mit der Position aller Kupplungen, inklusive der Endposition des Gestänges und der Richtung der Hochdruckdüse (Bild 12).

Der Monitor ist mit der Stationärbox auf Höhe des Galgens am Spülkopf verbunden. Diese Stationärbox übernimmt die Funktion als temporärer Zwischenspeicher für die aufgenommenen Daten aus dem Bohrgestänge. Zusätzlich werden in der Stationärbox die Drehrichtung des Gestänges und die mitlaufende Tiefenmessung aufgezeichnet.

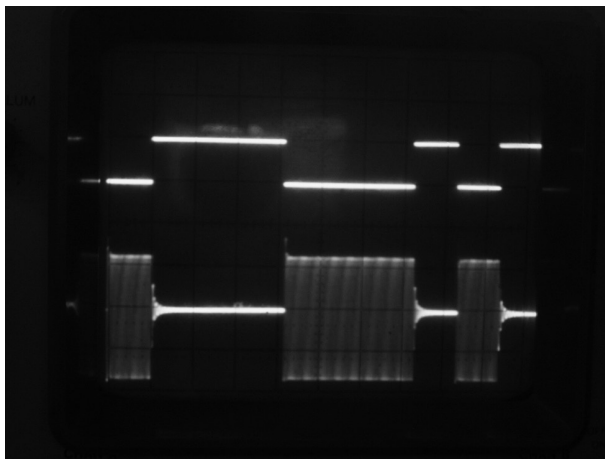
Die Ausrichtung des Bohrgeräts wird über den Richtungskompass am Bohrgerät erfasst. Auf diese Position beziehen sich die Neigungswerte aus dem Richtungsgestänge. Damit findet eine Orientierung der Messwerte auf den magnetischen Norden statt.

Die Drehung des Gestänges wird über den Drehwinkelgeber im Spülkopf aufgenommen, der die inkrementelle Position des Gestänges in

der Drehachse erfasst. In Kombination mit der Nordausrichtung des Grundgeräts wird daraus die Lage des Bohrgestänges in Bezug auf den Bohransatzpunkt abgeleitet.

Die Signalübertragung in der Datenleitung erfolgt nach dem Prinzip der Signaltechnik und wird für die digitale Datenübertragung umgesetzt. Wenn keine Daten übertragen werden, liegt die Spannung für die Energieversorgung an. Wenn Daten abgefragt werden, erfolgt die Weiterleitung in Intervallabfolgen von Spannungsschwankungen (Bild 13).

Das Kennzeichen der Verbindung der Gestängeeinheiten untereinander ist die komplementäre Übertragung von Energie und Daten in einer Leitung. Dies vereinfacht die Ankopplung an den Spülkopf, die Anbindung der Kupplungen untereinander und den Datentransfer aus dem Gestänge in die Stationärbox.



**Bild 13.** Visualisierung der Informationsübertragung in der Daten- und Energieleitung.

Tabelle 1 Beispielübersicht für Speicherung der Bohrabweichungen

Datum	Zeit	Messtiefe (n)	Kupp- lung BO	Kupplungen	KNr.	X- Abw.	Y- Abw.	R- Laenge	KNr.	X- Abw.	Y- Abw.	R- Laenge	KNr.
26.04.2022	16:28:13	-9,62	3	3	1	1	2	3	2	3	2	3	3
26.04.2022	17:35:28	-9,67	3	3	1	3	6	3	2	3	3	3	3
27.04.2022	12:15:45	-9,62	3	3	1	3	-3	3	2	4	-5	3	3
27.04.2022	11:52:50	-9,62	3	3	1	2	5	3	2	4	0	3	3
27.04.2022	11:27:26	-9,67	3	3	1	5	-4	3	2	2	-7	3	3
27.04.2022	11:07:37	-9,62	3	3	1	-2	1	3	2	0	1	3	3
27.04.2022	10:48:14	-9,57	3	3	1	7	2	3	2	7	-2	3	3
27.04.2022	10:26:12	-9,62	3	3	1	7	11	3	2	8	5	3	3
27.04.2022	10:00:11	-9,67	3	3	1	0	5	3	2	0	3	3	3
27.04.2022	08:45:07	-9,62	3	3	1	5	-3	3	2	2	-3	3	3
27.04.2022	08:10:19	-9,62	3	3	1	10	-3	3	2	8	0	3	3
12.04.2022	11:28:32	-9,6	3	3	1	3	2	3	2	2	-1	3	3
12.04.2022	13:27:03	-9,65	3	3	1	7	4	3	2	9	3	3	3
12.04.2022	14:20:12	-9,52	3	3	1	-3	13	3	2	1	7	3	3
12.04.2022	17:56:44	-9,67	3	3	1	4	-2	3	2	4	-3	3	3

Die Daten der Bohrlochvermessung werden über den Monitor im Fahrerhaus auf einen externen Server übertragen, der die Bohrlochverläufe pro Bohrung speichert. Auf ihn wird bei der weiteren Datenverarbeitung zurückgegriffen.

In Tab. 1 werden pro Zeile u. a. das Datum, die Uhrzeit, die Messtiefe (abgeleitet aus der Anzahl der eingebauten Kupplungen), die Abweichung pro Kupplung in  $x$ - und  $y$ -Richtung sowie die Rohrlänge ausgewiesen. Basierend auf diesen Datensätzen werden die Bohrabweichungen in der Düsebene ermittelt.

### 2.3 Visualisierung der Bohrlochabweichungen

Die „Ist-Position“ im Düshorizont und daraus abgeleitet der Überschneittpunkt der Düsenstrahlsäulen ist von maßgebender Bedeutung bei wasserdichten Düsenstrahlsohlen. Die Auswertung der Ist-Positionen der Einzelsäulen wird in der Regel von den ausführenden Firmen als „dynamische Planung“ begleitend zur Ausführung auf der Baustelle vollzogen.

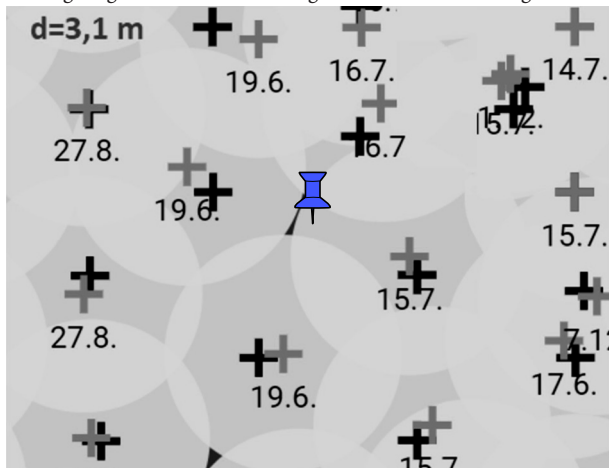


Bild 14. Visualisierung der Ergebnisse der Bohrlochvermessung.

Pro Bohrung wird die tatsächliche Lage aus der Bohrlochvermessung dokumentiert und mit der planmäßigen Lage der Bohrung verglichen. Dabei werden einerseits die Bereiche sichtbar, die einen ausreichenden Überschchnitt aufweisen, sowie andererseits die Stellen, an denen die Bohrungen „verlaufen“ sind. Letztere geben Hinweise auf mögliche Fehlstellen der ausgeführten Düsenstrahlsole (Bild 14).

Die schwarzen Kreuze in Bild 14 zeigen die planmäßigen Säulenmittelpunkte, die grauen Kreuze kennzeichnen die tatsächlichen Mittelpunkte der ausgeführten DSV-Säulen. In diesem Bereich sind 2 mögliche Fehlstellen eingekreist worden, die unter der Annahme eines Säulendurchmessers von 3,10 m entsprechend den Vorgaben aus der Probe-säulenvermessung ermittelt wurden.

Mit herkömmlicher Technik liegen die Ergebnisse der Bohrlochvermessung erst nach dem Düsenvorgang vor. Die Datenauswertung kann erfolgen, wenn das Gestänge wieder gezogen wurde und die Daten aus dem Einzelinklinometer ausgelesen worden sind.

Wenn mögliche Undichtigkeiten schon während der Ausführung erkennbar werden, lassen sich die Nacharbeiten auf Zusatzsäulen einschränken. Diese können kurzfristig ausgeführt werden, denn das Bohrgerät befindet sich zu diesem Zeitpunkt noch im relevanten Ausführungsbereich. Der zeitliche Aufwand hierfür ist nur im geringen Umfang bauzeitenrelevant.

Es ist offensichtlich, dass die Verwendung des Richtungsgestänges mit der Online-Vermessung des Bohrlochverlaufs deutliche zeitliche Vorteile bietet. Besonders sinnvoll kann das Richtungsgestänge für die Steuerung der Bohrung verwendet werden.

## 2.4 Bohrlochsteuerung („measurement while drilling“)

Die Richtung der Bohrungen kann über zwei Einwirkungsgrößen gesteuert werden:

- die Rückstoßkraft des Düsenstrahls;
- die Abtriebskraft auf das Bohrgestänge aus einer asymmetrischen Bohrkronen.

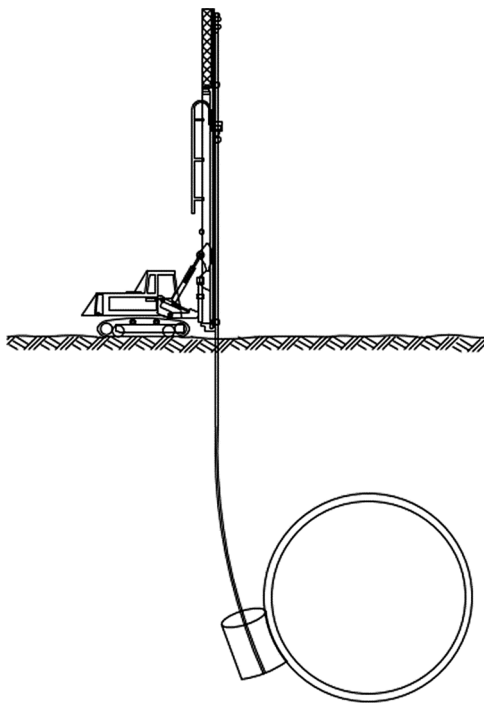
In beiden Fällen ist die Kenntnis der tatsächlichen Position des Düsenmonitors oder der Bohrkronen erforderlich. Dies ist durch die Visualisierung der Bohrung beim Richtungsgestänge jederzeit möglich.

In der Regel sind die Düsenmonitore mit einer Hauptdüse versehen, die beim Düsenvorgang einen Rückstoß erzeugt, der das Gestänge in die entgegengesetzte Richtung drückt. Wenn die Position der Düse bekannt ist, kann dieser Effekt genutzt werden, um die Richtung der Bohrung zu verändern. Beim Bohren mit asymmetrischer Bohrkronen (Bild 15) erzeugt der axiale Vorschub auf das Richtungsgestänge ein gezieltes Ausweichen der Bohrkronen, was zu einer gewünschten Richtungsänderung der Bohrung führt.



Bild 15. Aufbau einer asymmetrischen Bohrkronen.

Damit lassen sich qualifizierte Bohrungen in der unmittelbaren Nähe zu kritischen Infrastrukturen mit hoher Sicherheit ausführen, da die tatsächliche Lage der Bohrung dank der Aufzeichnung bekannt ist und auf dem Monitor sichtbar wird. Unplanmäßige Abweichungen können durch die beschriebenen Maßnahmen korrigiert werden.



**Bild 16.** Gesteuerte Bohrung in Nähe einer tief liegenden U-Bahn.

Ist die genaue Lage von unterirdischen Bauwerken bekannt, können Düsenstrahlkörper in beliebiger Nähe zu dieser kritischen Infrastruktur hergestellt werden, wenn auf den Verlauf der Bohrung in richtungsgebender Form Einfluss genommen werden kann (Bild 16).

Die Genauigkeit der Bohrlochvermessung lässt sich jederzeit effektiv durch Drehung des Bohrgestänges um einen Winkel von jeweils 90° prüfen. Auf Endtiefe müssen alle Positionen, also 90°, 180°, 270°, 360° und  $360^\circ + 90^\circ = 450^\circ$  jeweils die gleiche Position der Bohrkronen ausweisen.

### **3 Körperschallmessungen**

#### **3.1 Theoretischer Hintergrund zur Bestimmung von Probensäulen mittels Körperschallmessungen**

Das Düsenstrahlverfahren ist grundsätzlich mit Energieeintrag in den Untergrund verbunden. Der Düsenstrahl durchschneidet den anstehenden Boden und verwirbelt ihn mit der eingebrachten Wasser-Zement-Suspension. Trifft der Düsenstrahl auf bereits ausgehärtete DSV-Säulen, wird ein Kraftimpuls in die Säule eingetragen. Innerhalb der Säule breitet sich der induzierte Körperschall im Wesentlichen in Form von Kompressionswellen mit hoher Ausbreitungsgeschwindigkeit aus. Diesen physikalischen Effekt nutzt man, um mithilfe geeigneter Sensoren die Momente des Auftreffens und des Verlassens des Düsenstrahls auf die Säule zeitgenau bestimmen zu können.

Durch messtechnische Erfassung des Körperschalls in der ausgehärteten Säule kann bei entsprechender Signalaufbereitung also deutlich unterschieden werden, wann der Düsenstrahl durch den umgebenden Baugrund streift bzw. eine Säule trifft und wieder verlässt. Solange der Düsenstrahl den Boden durchschneidet, zeichnen sich die entstehenden Baugrundschwingungen dadurch aus, dass insbesondere die hochfrequenten Anteile der Signale stark gedämpft werden und die Amplituden entfernungsbedingt sehr schnell abnehmen. Trifft der Strahl auf die ausgehärtete Düsenstrahlsäule, breiten sich aufgrund der höheren Festigkeit des Säulenmaterials gegenüber dem Boden die

Körperschallwellen breitbandig, d. h. in einem weiten Frequenzband, in der Säule aus.

Dieser Unterschied in Bezug auf die Körperschallausbreitung in ausgehärteten DSV-Säulen und im Boden wird genutzt, um die Überschneidung des Düsenstrahls mit der ausgehärteten Säule zu erkennen und über geometrische Beziehungen deren Durchmesser zu bestimmen. Der Durchmesser der ausgehärteten Säulen wird auf Basis der gemessenen Kontaktzeit des Düsenstrahls mit der ausgehärteten Säule und unter Kenntnis des Abstands des Düsenstrahlmonitors zum Mittelpunkt der ausgehärteten Säule berechnet.

In Bild 17 ist eine typische Versuchsanordnung für eine Probesäulenvermessung dargestellt.

### 3.2 Messdatenerfassung und Auswertung

Der Körperschall in der ausgehärteten Säule wird mit einem Beschleunigungssensor erfasst. Dieser wird unmittelbar nach dem Düsenvorgang in der noch frischen Säule, z. B. mittels eines Stahlrohrs und eines Magneten, mittig in der Säule platziert. Um die relevanten

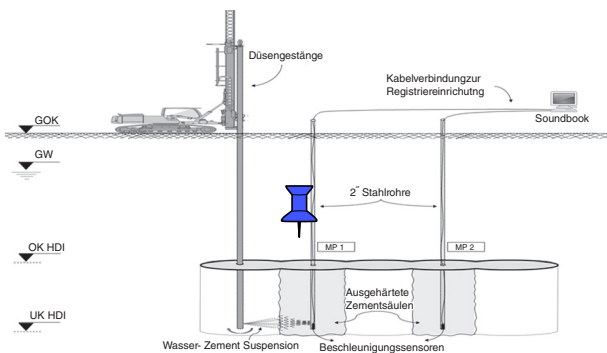
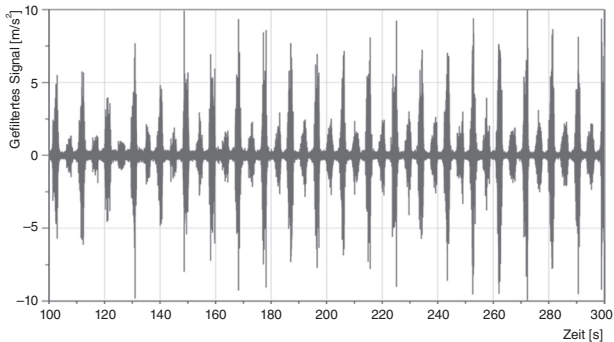


Bild 17. Versuchsanordnung für die Probesäulenvermessung.

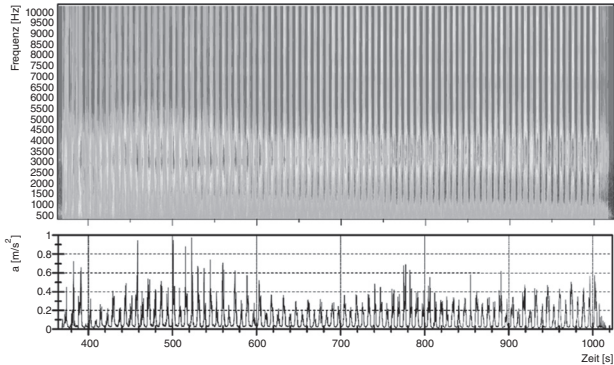


**Bild 18.** Beispielhafter Zeitverlauf der Schwingbeschleunigung in einer ausgehärteten, zu vermessenden Säule.

Frequenzanteile des Signals zu registrieren, erfolgt die digitale Abtastung des analogen Signals mit einer sehr hohen Abtastrate  $> 16$  kHz.

Bild 18 zeigt einen typischen Beschleunigungs-Zeitverlauf während eines Düsenvorgangs. Das Diagramm verdeutlicht exemplarisch das An- und Abschwellen des Signals und somit jeweils den Beginn und das Ende jedes Kontakts des Düsenstrahls mit der zu vermessenden Säule. Das Signal wiederholt sich in diesem Anwendungsbeispiel ca. alle 9 s und weist eine Zeitdauer von ca. 2 s auf. Zwischen den Signalen, die auf den Kontakt des Düsenstrahls mit der ausgehärteten Säule zurückzuführen sind, werden Körperschallsignale mit geringeren Amplituden aufgezeichnet. Diese verminderte Schwingungsanregung ist auf die kleinere Stabilisierungsdüse zurückzuführen, die der Hauptdüse gegenüberliegt.

Anhand eines Spektrogramms (Bild 19) kann der zeitlich veränderliche Frequenzinhalt des aufgezeichneten Schwingungssignals verdeutlicht werden. Die Körperschallanteile mit der höchsten Energie (hellgrau) treten während des Kontakts des Düsenstrahls mit der



**Bild 19.** Beispielhaftes Spektrogramm: Visualisierung des zeitlichen Verlaufs der Frequenzinhalte des Beschleunigungssignals.

Säule auf und liegen i. d. R. in einem Frequenzbereich zwischen 1 kHz und ca. 6 kHz.

Die weitere Aufbereitung des Beschleunigungs-Zeitsignals erfolgt mittels:

- eines geeigneten Bandpass-Filters im Bereich des relevanten Frequenzinhaltes (z. B. 1 kHz bis 6 kHz);
- der Berechnung von gleitenden Effektivwerten (*RMS*-Werte: Root Mean Square) mit geeigneter Zeitfensterlänge (Gl. 1)

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{t_1}^{t_2} a^2(t)} \quad (1)$$

mit  $t_2 - t_1 = \tau$  (z. B.  $\tau = 0,1$  s);

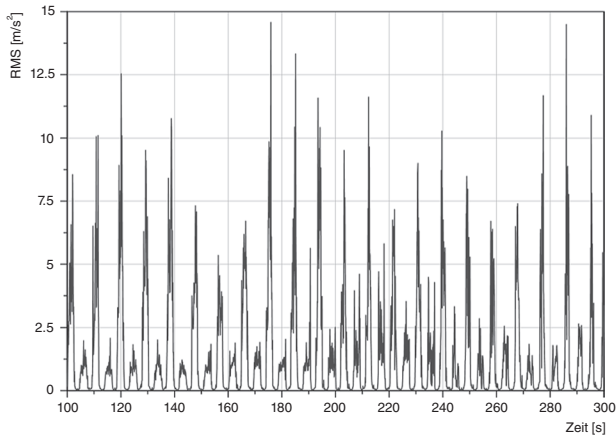
- einer Reduktion der *RMS*-Messdaten durch Klassifizierung.

Die genauen Parameter für die Grenzen des Bandpassfilters und das gleitende Zeitfenster der Effektivwertbildung können je nach Projekt

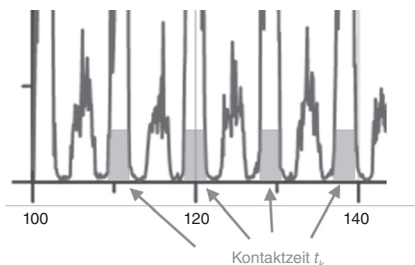
bzw. in Abhängigkeit von den gegebenen Randbedingungen etwas voneinander abweichen. Der Vorteil der Anwendung des beschriebenen Bandpassfilters liegt darin, dass lediglich die Signale, die auf den Düsvorgang zurückzuführen sind, in die weitere Auswertung eingehen. Eher tieffrequente Schwingungsanregungen, die aus allgemeinem Baustellenbetrieb resultieren – hierzu zählt auch der Motor- und Bohrbetrieb des Bohrergeräts selbst –, werden so aus dem Nutzsignal herausgefiltert. Die Effektivwertbildung ermöglicht die zeitliche Darstellung der Energie des Körperschallsignals und führt i. d. R. zu einer Erhöhung der Signifikanz der aufgezeichneten Ereignisse.

Als Ergebnis zeigt sich ein Effektivwertverlauf des Signals, aus dem die Kontaktzeiten relativ einfach abgelesen werden können (Bild 20).

Über die Bestimmung der Kontaktzeit  $t_k$  je Umdrehung des Gestänges (Bild 21) kann unter Berücksichtigung des Abstands des Düskopfs



**Bild 20.** Beispielhafter Effektivwertverlauf des gefilterten Signals (1 kHz).



**Bild 21.** Ausschnitt des Effektivwertverlaufs der Beschleunigung mit Kennzeichnung der Kontaktzeit.

zum Mittelpunkt der ausgehärteten Säule die Berechnung des Säulendurchmessers erfolgen (Gl. 2; Bild 21).

$$D = 2 \cdot b \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2)$$

$$\text{mit } \alpha = t_k \cdot \omega$$

Hierbei sind:

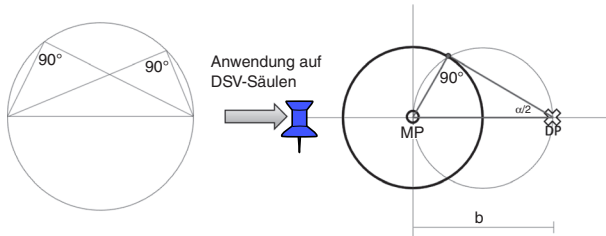
$D$  = Durchmesser der ausgehärteten Säule

$\alpha$  = Überschneidungswinkel des Düsenstrahls mit der Säule (Kontaktwinkel)

$b$  = Abstand der aktuellen Lage des Düskopfs zum Mittelpunkt der ausgehärteten Säule

$t_k$  = gemessene Berührungszeit des Düsenstrahls mit der ausgehärteten Säule (Kontaktzeit)

$\omega$  = Winkelgeschwindigkeit des Düsendüstengestänges  $\left(\omega = \frac{360^\circ}{T}\right)$ ;  $T$ : Periodendauer



**Bild 22.** Skizze zur Berechnung des Durchmessers einer ausgehärteten Säule.

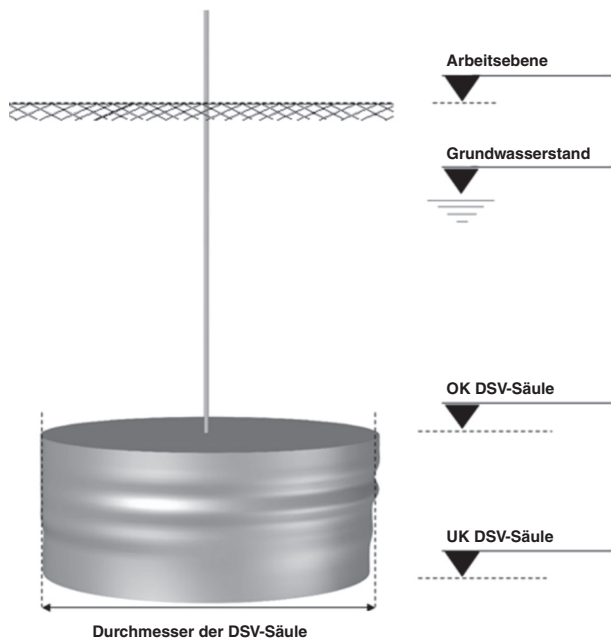
Grundlage für die Durchmesserberechnung ist die Anwendung des Satzes von Thales (Bild 22). Dieser besagt, dass in einem Halbkreis, dessen Durchmesser eine Strecke darstellt, alle Winkel zu der Umfangslinie des Kreises rechtwinklig sind. Der Winkel zwischen einem Durchmesser und einer beliebigen Sekante des Halbkreises beträgt also immer  $90^\circ$ .

Durch die Messung der Kontaktzeit des Düsenstrahls mit der ausgehärteten Säule wird der Winkel ermittelt, mit dem das rechtwinklige Dreieck im Thales-Kreis gebildet werden soll. Daraus lässt sich durch einfache trigonometrische Beziehungen der Radius der ausgehärteten Säule ableiten.

Diese Schlussfolgerung ergibt sich unter der Annahme, dass die Anregungssäule und die ausgehärtete Säule den gleichen Durchmesser aufweisen und der Abstand  $b$  eine vorgegebene Größe nicht überschreitet (Gl. 3).

$$b < \frac{D}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

$D$  = Durchmesser der Anregungssäule bzw. ausgehärteten Säule



**Bild 23.** Geometrie der ausgewerteten Probesäule (UK: Unterkante; OK: Oberkante).

Jeder Kontakt des Düsenstrahls mit der ausgehärteten Säule ermöglicht den Rückschluss auf die Geometrie der Probesäule. Durch das Hochziehen des Düsenstrahlgestänges beim Andüsen der Probesäule entstehen mit jeder Umdrehung Kontaktzeiten, die auswertbar sind. Dadurch wird die Probesäule aus diskreten Scheiben mit dazugehörigen Durchmessern aufgebaut. Von beiden Seiten ausgeführt, ergibt sich daraus das 360°-Profil der Probesäule (Bild 23).

#### 4 Qualitätsüberwachung von zusammengesetzten Düsenstrahlkörpern

Der Körperschalleintrag eines Düsenstrahls lässt sich auch in zusammengesetzten Düsenstrahlkörpern nachweisen und im Hinblick auf die Qualitätssicherung auswerten. Voraussetzung ist die Positionierung von Körperschallsensoren in den hergestellten Primärreihen.

In der Regel werden Düsenstrahlsohlen in primären und sekundären Reihen ausgeführt. Die Tagesproduktion ist in Bild 24 durch jeweils verschiedene Grautöne dargestellt.

Dabei sind die Primärreihen ausgehärtet, wenn die Sekundärsäulen hergestellt werden. Diese Herstellfolge erlaubt es, die Ausführung der Sekundärreihen beim herstellungsbedingten Körperschalleintrag in die Primärsäulen zu überwachen und nach festgelegten Qualitätskriterien auszuwerten.

Entscheidend für die Qualität einer wasserdichten Sohle ist der planmäßige Anschluss der Sekundärsäulen an die ausgehärteten Primärsäulen. Der Einstichplan, der die Bohransatzpunkte aller Säulen

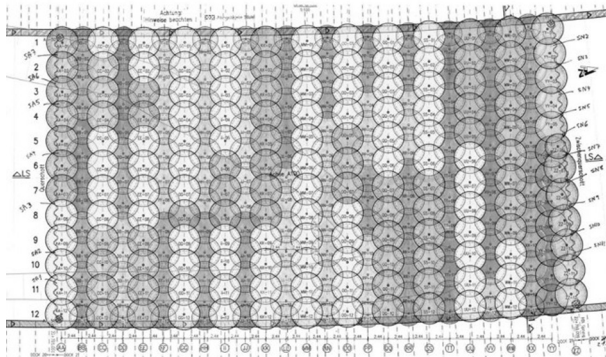


Bild 24. Einstichplan einer Düsenstrahlsohle.

beinhaltet, ist in der Regel so angelegt, dass das Zentrum der Sekundärsäulen den Zwickeln der Primärreihen gegenüberliegt. Der beim Düsen an dieser Position entstehende Kontakt der Sekundärsäule mit der Primärsäule erzeugt ein charakteristisches Messsignal am Sensor der Primärsäule, dass sich bei der Herstellung einer jeder Sekundärsäule wiederholt.

#### 4.1 Die vier Charakteristika eines Kontaktsignals

Den Schlussfolgerungen aus [5] folgend, lassen sich vier grundlegende Charakteristika eines Kontaktsignals unterscheiden, die beim Andüsen der Sekundärsäulen an die Primärsäulen erzeugt werden:

1. Der **Regelfall** erfasst beide bereits ausgehärteten Primärsäulen und erreicht den kritischen Punkt des Zwickels planmäßig mit dem Düsenstrahl. Dies ist in dem Effektivwertsignal der Beschleunigung ( $RMS = \text{Root Mean Square}$ ) erkennbar (Bild 25).
2. Dem Regelfall steht der sogenannte **Zwickelfehler** gegenüber (Bild 26). Bei diesem wurde der geometrisch entfernteste Punkt (Zwickel) nicht vollständig erodiert. Im aufgezeichneten Signal ist er dadurch gekennzeichnet, dass sich eine deutliche Amplitudenreduktion im Effektivwertverlauf der Beschleunigung zeigt.

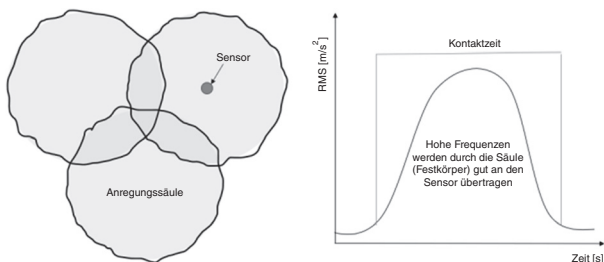


Bild 25. Regelkontakt.

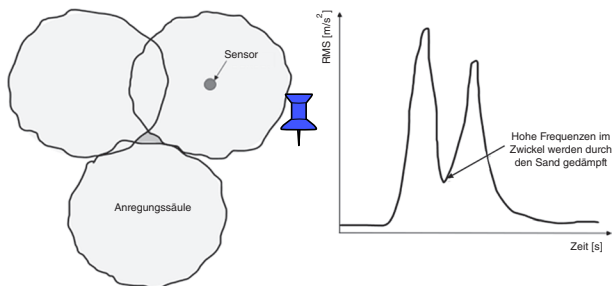


Bild 26. Zwickelfehler.

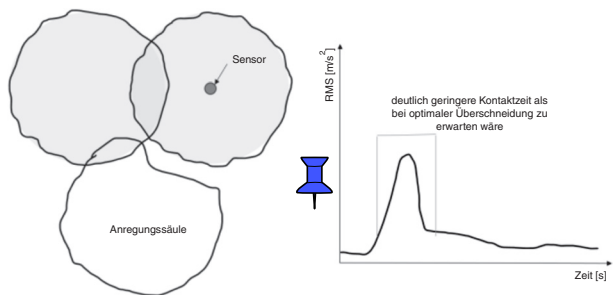
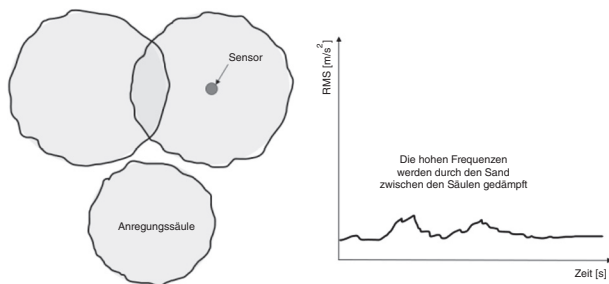


Bild 27. Einseitiger Kontakt.

3. Wird dagegen bei einem **einseitigen Kontakt** nur eine der beiden gegenüberliegenden Säulen angedüst, wird dies durch einen einseitig verschobenen Effektivwertverlauf der Beschleunigung abgebildet (Bild 27).
4. Findet **kein direkter Kontakt** des Düsenstrahls mit den ausgehärteten Primärreihen statt, werden die hohen Frequenzanteile des Körperschallsignals stark gedämpft und betragsmäßig nur in



**Bild 28.** Keine Überschneidung.

geringem Maß auf die Primärsäule übertragen. Die Amplituden des Effektivwertverlaufes fallen entsprechend klein aus (Bild 28).

Diese grundsätzlichen Signalcharakteristiken stellen Referenzprofile dar, die eine ausführungsbegleitende Überwachung des Anschlusses der Sekundärsäulen an die Primärsäulen ermöglichen.

Die Aufzeichnung und Auswertung der Erschütterungssignale nach diesen Mustern eröffnet neue Nachweisformen der vertragskonformen Ausführung. Die Ergebnisse durchgeführter Grundsatzversuche legen den Schluss nahe, dass die Sensoren bis zu einem Abstand von ca. 7,50 m zur Düsqelle positioniert werden können und dabei noch ausreichend hochwertige Körperschallsignale in der Primärsäule erfassen. Es ist daher nicht erforderlich, Körperschallsensoren in jeder Primärsäule für die fortlaufenden Nachweismessungen zu installieren.

Der Einfluss des Typs der Arbeitsfugen in der Düssfolge ist im Rahmen der Untersuchungen von [6] genauer untersucht und als vernachlässigbar klein eingeschätzt worden. Die Aushärtung der Düssäulen im Rahmen der regulären Ausführungszeiten spielt für das Abstandsrasster der Messaufnehmer keine nennenswerte Rolle. Das Diagramm in Bild 29 beinhaltet die Aufbereitung des Signals in Form eines Leistungsdichtespektrums und zeigt, dass auch bei einem Abstand des

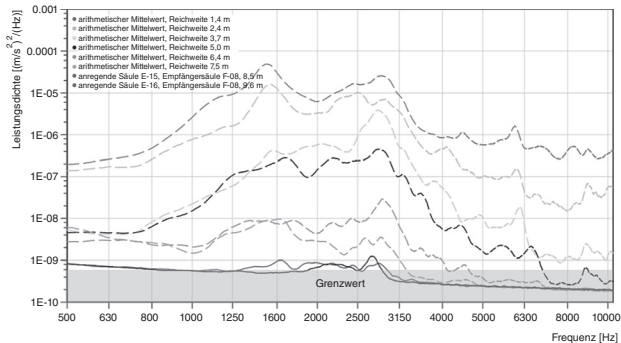


Bild 29. Frequenzabhängige Leistungsdichte.

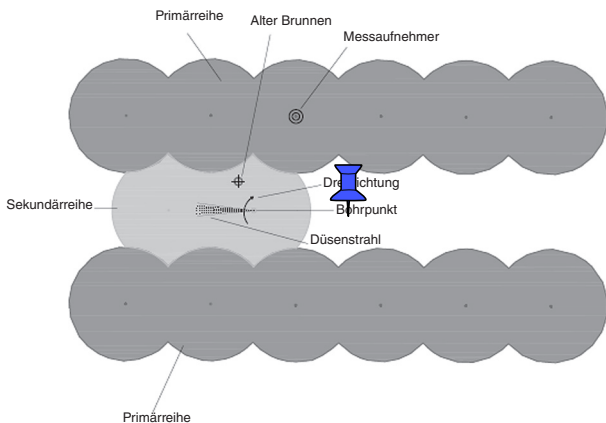
Sensors zum Düsgestänge von 7,50 m noch aussagefähige Auswertungen vorgenommen werden können.

## 4.2 Erkennung von Düsschatten

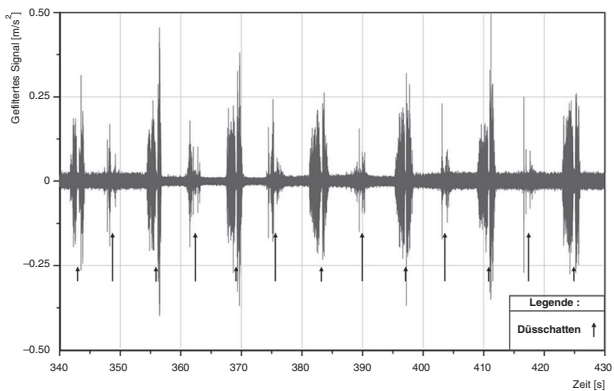
Düsschatten infolge unbekannter Baugrundhindernisse sind nachhaltige Projektrisiken. Der Begriff der Schattenbildung bezieht sich auf das Wirkungsprinzip des Hochdruckstrahls. Hindernisse im Wirkungspfad des Hochdruckstrahls blockieren die Erosionswirkung dahinter und erzeugen Störzonen, die größer als das eigentliche Hindernis sind. Solche Hindernisse können z. B. alte Brunnen sein, die nicht in den Bestandsunterlagen eingetragen sind, verlorenes Sondier-/Bohrgestänge o. Ä. (s. Bild 30).

Das Risiko eines nicht erkannten Düsschattens kann durch die ausführungsbegleitende Körperschallmessung in ausgehärteten Primärsäulen signifikant reduziert werden.

Basierend auf den Körperschallmessungen lässt sich schlussfolgern, dass der Düsenstrahl nicht die erwarteten Signale erzeugt. Es treten



**Bild 30.** Lageplan einer Düsenstrahlsole mit Düsschatten durch einen alten Brunnen.



**Bild 31.** Signalaufzeichnungen ausgelöst durch Düsschatten.

regelmäßige Störungen in der Signalübertragung auf, die sich bei jeder Umdrehung und in allen Tiefenlagen manifestieren. Offensichtlich wird der Düsenstrahl durch ein Hindernis beeinträchtigt, was mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem Düsenschatten führt (Bild 31).

Wenn derartige Auffälligkeiten bereits während der Ausführung erkannt werden, können Zusatzsäulen ausgeführt werden, die sich mit ähnlich geringem Aufwand in die Ausführungsfolge integrieren lassen.

## 5 Ausblick

Nach derzeitigem Stand der Technik werden Temperaturmessungen des im Trog eingeschlossenen Grundwassers während der Probeabsenkung durchgeführt, um Temperaturveränderungen während der Grundwasserabsenkung im Trog zu bewerten. Als mögliches Ergebnis sind Rückschlüsse auf Undichtigkeiten in der Baugrubenumschließung oder der Düsenstrahlsohle möglich, nämlich dort, wo kaltes Wasser von außen in das warme Wasser im Trog einströmt.

Dafür werden in einem Regelraster zusätzliche Pegel gebohrt und mit Temperatursensoren ausgerüstet. Dies könnte durch die beschriebenen Körperschallmessungen in Primärsäulen ersetzt werden, da der Kontakt zwischen den einzelnen Düsenstrahlsäulen bereits während der Herstellung geprüft werden kann.

Die Ausführung von Zusatzpegeln und deren Aufrüstung mit Temperatureaufnehmern ist kostenintensiv und nimmt zusätzliche Bauzeit in Anspruch, die mit ausführungsbegleitenden Körperschallmessungen erheblich reduziert werden kann.

## Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 12716-2019-03: *Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Düsenstrahlverfahren*. Berlin: Beuth.
- [2] DIN EN 12715-2021-01: *Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Injektionen*. Berlin: Beuth.

- [3] Sondermann, W. und Kirsch, F. (2018). Baugrundverbesserungen und Injektionen. In: (Hrsg. K.J. Witt), *Grundbautaschenbuch: Teil 2. Geotechnische Verfahren*. 8. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn.
- [4] Buske, G. und Yoshuida, H. (2013). Jet Grouting. In: (ed. K. Kirsch und A. Bell), *Ground Improvement*. 3<sup>rd</sup> ed. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- [5] Eberhardt, A.S. (2024). *Die Auswertung von Erschütterungsmessungen aus Baustellenversuchen zur Ableitung von Geometriekriterien bei Düsenstrahlkörpern*. (unveröffentlichte Masterarbeit). Technische Universität Berlin.
- [6] Kant, E. (2023). *Untersuchungen von körperschallinduzierten Körperschall in Primärsäulen auf der Baustelle Pergamonmuseum unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Abständen, Aushärtungszeiten und verfahrenstypischen Fugenausbildungen von DSV-Säule*. (unveröffentlichte Masterarbeit). Technische Universität Berlin.

AQ1 Bitte diese Tabelle überprüfen und ggf. bestätigen.