

Aufgrund von spezifischen Anforderungen für zukünftige Projekte wurde der Verfasser im Jahre 1993 mit der Aufgabe betraut, eine neue Methode zum Herstellen geneigter bzw. horizontal zementierter Erdrohre zu entwickeln. Die Anwendungsgebiete liegen im innerstädtischen Tunnelbau für Bereiche, die durch Bebauung von oben nach herkömmlicher Methode nicht zugänglich sind. Dort, wo es gilt, Setzungen des Erdreichs zu verhindern, bietet die hier dargelegte Methode Sicherheit mittels der Herstellung von runden Schutzschirmen um die zukünftige Tunnelausbruchröhre.

Ferner können solche Abdichtungsschirme unter bestehenden Industrieanlagen notwendig werden, um ein Ausbreiten von versickernden umweltgefährdeten Stoffen wirkungsvoll zu verhindern. Der Verfasser hat das Konzept dieser Methoden und die dazugehörigen Werkzeuge entwickelt. Herr J. Seitz hat hierfür das Mischkonzept erarbeitet und mit dem Verfasser verantwortlich den Test durchgeführt. Die hier aufgezeigten Verfahren sind patentiert.

New horizontal grouting methods. In the year 1993 the author was requested to develop a new grouting method for inclined and horizontal cement soil tubes for future projects to come. The application fields for such new technology should open following prospective market sectors:

1. Building protection shield for tunneling in inaccessible areas for vertical grouting equipment.
2. Structural and ground water protection shields.
3. Tightening curtains for existing waste disposal and contaminated sites.

The concept of the new method and the specific tools have been developed by the author. Further Mr. J. Seitz designed the mix concept and executed together with the author the test on site. The methods here in after presented are subject to a patent.

1 Einführung

Im Erdöl- und Gasrohrleitungsbau wird die steuerbare Horizontalbohrtechnik seit mehr als zehn Jahren eingesetzt.

Das Verfahren wurde in den USA aus der Vertikalbohrtechnik zur Erdöl- und Gasquellenerschließung entwickelt.

Anstatt Leitungen in konventioneller Bauweise in offenen Gräben zu verlegen, wird bei der HDD-Methode (Horizontal Directional Drilling) das zu verlegende Rohr durch die vorgebohrte Röhre eingezogen. Die HDD-Methode wird hauptsächlich zum Verlegen von Rohrleitungen (Bild 1) unter Flüssen, Kanälen und stark befahrenen Straßen und Eisenbahnlinien eingesetzt.

Die überlegenen Vorteile dieser Methode bestehen darin, daß sowohl der Verkehr nicht unterbrochen werden muß, als auch in der potentiellen Kosteneinsparung gegenüber konventionellen Methoden (Dredging, Aushub unter Wasserhaltung und Spundwänden, Verkehrsumlenkungen).

Mit dieser Methode wurden Rohrleitungen mit Längen von über 1600 m und Durchmessern bis zu $\varnothing 36''$ (ca. 90 cm) verlegt.

Die HDD-Methode läßt sich in fast allen durch Bentonit stützbar Böden verlegen.

In den letzten Jahren hat die zielgenaue Horizontalbohrtechnik im Ingenieurbau an Bedeutung gewonnen [1]. Die Firma Bilfinger + Berger hat in Asien (Thailand) mit einer amerikanischen Bohrfirma ein Unternehmen gegründet mit den in Bild 1 aufgelisteten Geschäftsfeldern. Diese Kombination eröffnet Synergieeffekte zur Entwicklung neuer Technologien mit neuen Anwendungsfeldern (Bild 1).

2 Die Bohrtechnik

Die Bohranlage setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

1. Bohrergerät
2. Stromerzeugungsaggregat
3. Antriebseinheit
4. Steuerstand
5. Bentonitmisch- und Pumpanlage
6. Material- und Mannschaftscontainer
7. Hydraulikbagger + Kran
8. Antimagnetisches Rohrteil mit Winkelstück
9. Bohrgestänge (Rohre)
10. Bohrwerkzeuge: Bohrkopf, Aufweitungsbohrköpfe $\varnothing 24''$, $\varnothing 36''$, $\varnothing 42''$, $\varnothing 54''$, Führungskörper
11. Vermessungseinrichtungen: Sonde mit Kompaß und Neigungsmesser, Tru Trackersensor

Die Bohranlage, der Bohrvorgang sowie das Einziehen des Rohres sind ausführlich in [2] beschrieben.

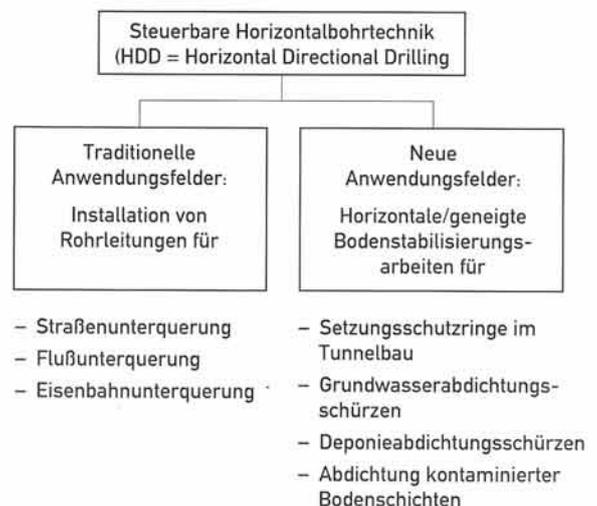


Bild 1. Anwendungsfelder der steuerbaren Horizontalbohrtechnik

Fig. 1. Application fields of Horizontal Directional Drilling

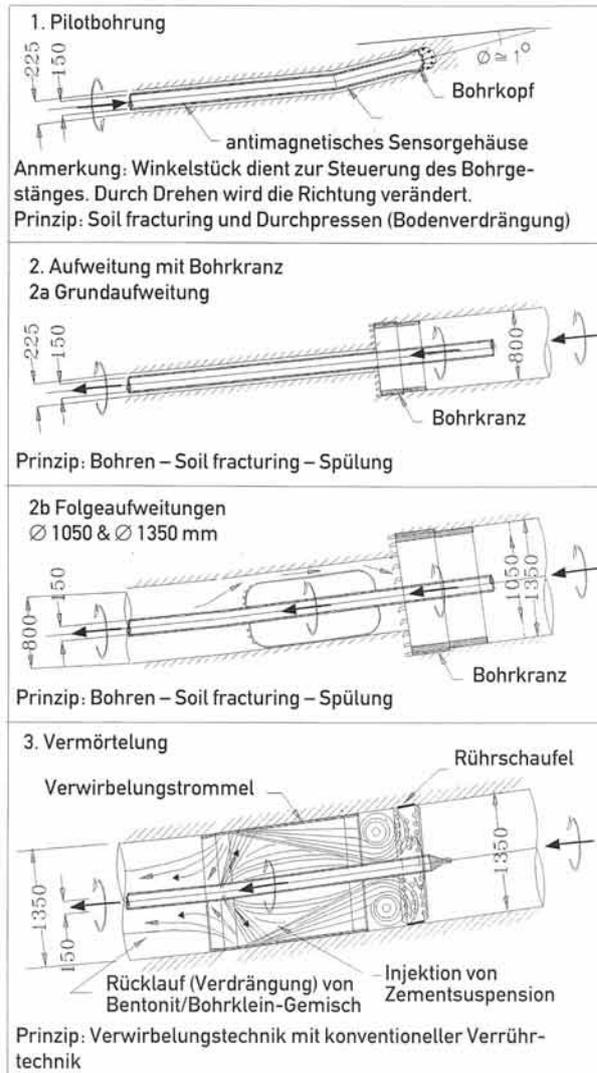


Bild 2. Arbeitsphasen der Bohrtechnik sowie der Zementstabilisationstechnik
 Fig. 2. Drilling phases and Cement-Injection phase

Die Herstellung einer Bohrung erfolgt in zwei prinzipiellen Schritten (Bild 2). Zur Erzielung der Richtungsgenauigkeit wird eine Pilotbohrung durchgeführt. Das Pilotbohrgestänge wird in den Boden gedrückt. Dabei wird aus Düsen, die sich im Bohrkopf befinden, Bentonitsuspension unter hohem Druck (50–100 bar) gespritzt. Dieser Düsenstrahl (Soil Fracturing) schneidet die Bodenstruktur auf und erlaubt das Vorpressen des Pilotbohrgestänges.

Der Bohrkopf befindet sich auf einem ca. 2 m langen Rohrsegment, das um ca. 1°–2° gegenüber der Rohrachse abgewinkelt ist. Zur Steuerung wird das Bohrgestänge um die Rohrachse gedreht, um jede gewünschte Richtung zu erreichen. Die Genauigkeit der Bohrung hängt von der Vorschublänge nach jeder Messung und der Einstellung der Rohrachse sowie der Bodenart ab. Nach Fertigstellung der Pilotbohrung wird der Bohrkopf abgeschraubt und der Aufweitungsbohrkopf (Ø 24", wahlweise Ø 36") aufgesetzt. Das Bohrgerät zieht nun unter Drehung des Aufweitungsbohrkopfes, der durch einen Führungskörper in der Bohrlochbahn gehalten wird, zum

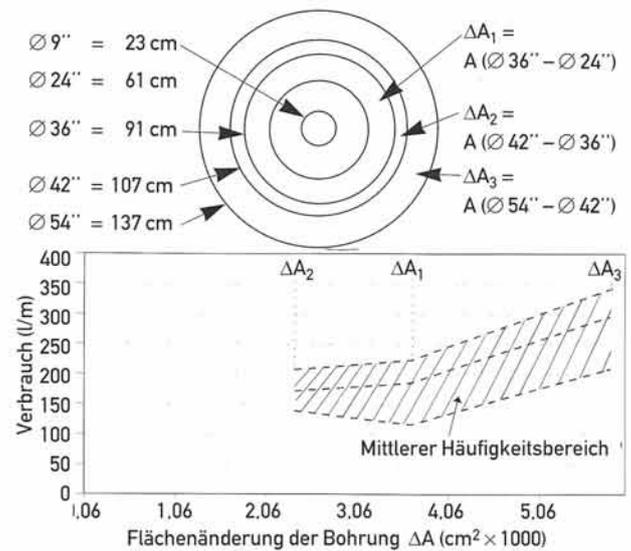


Bild 3. Bentonitsuspensionverbrauch während der Aufweitungsbohrungen
 Fig. 3. Bentonit suspension consumption during the reaming phases

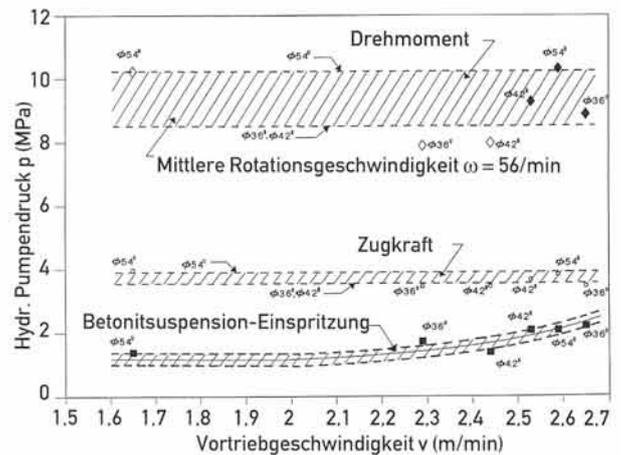


Bild 4. Hydraulische Druckparameter der Antriebspumpe für die Aufweitungsbohrungen von Ø 9" auf Ø 36" auf Ø 42" auf Ø 54"
 Fig. 4. Hydraulic pressure parameters of power unit for the reaming phases from Ø 9" to Ø 36" to Ø 42" to Ø 54"

Ausgangspunkt. Dabei wird während des rotierenden Bohrvorgangs aus den Düsen am äußeren Rand des Bohrkopfes Bentonitsuspension unter hohem Druck gespritzt (Bild 3). Der Boden wird während dieser zweiten Arbeitsphase durch Soil Fracturing und mechanisches Bohren gelöst. Besonders bei tonigen/schluffigen Böden wird durch die Düsenstrahlen verhindert, daß sich vor dem Bohrkopf eine Schmierpaste bildet, die die Effektivität des Bohrens reduziert.

Die mittlere optimale Häufigkeit der hydraulischen Parameter der Antriebspumpe für die Zugkraft, Drehmoment und Bentonit-Suspension-Einspritzung für schluffige/tonige Böden sind in Bild 4 gegeben. Die Streuung der Bandbreite ist stark ab-

hängig von der Erfahrung des Bohrmeisters. Das Bentonit-Bohrklein-Wasser-Gemisch dient so aufgrund der thixotropen *Bingham*-Charakteristik als Stützflüssigkeit der offenen Röhre.

Während des Ziehvorgangs wird am Bohrgerät jeweils eine Rohrlänge abgeschraubt und am Ende der Bohrung ein Rohr angesetzt, so daß jeweils unabhängig von der Lage des Aufweitungsbohrkopfes im Bohrloch das Bohrgestänge (Rohr) vom Anfang bis zum Ende der Bohrung reicht, damit nach Beendigung eines jeden Bohrvorgangs ein weiterer Aufweitungbohrkopf mit dem nächst größeren Durchmesser ($\varnothing 42''$, $\varnothing 54''$) installiert und der vorherige Bohrkopf am Bohrgerät (Anfang der Bohrung) entnommen werden kann.

3 Die Vermessungstechnik

Die Vermessungstechnik und Steuerungsmöglichkeit sind entscheidend für den erfolgreichen Einsatz der zielgenauen Ausführung der Horizontalbohrtechnik. Die prinzipiellen Verfahren der Vermessungstechnik sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die Lage des Bohrkopfes wird im allgemeinen durch ein Sensorpaket bestimmt, welches sich hinter dem Bohrkopf in einem antimagnetischen Rohrstück befindet. Dieses Sensorpaket besteht aus einem unempfindlich gelagerten Kompaß und Inclinometerset mit

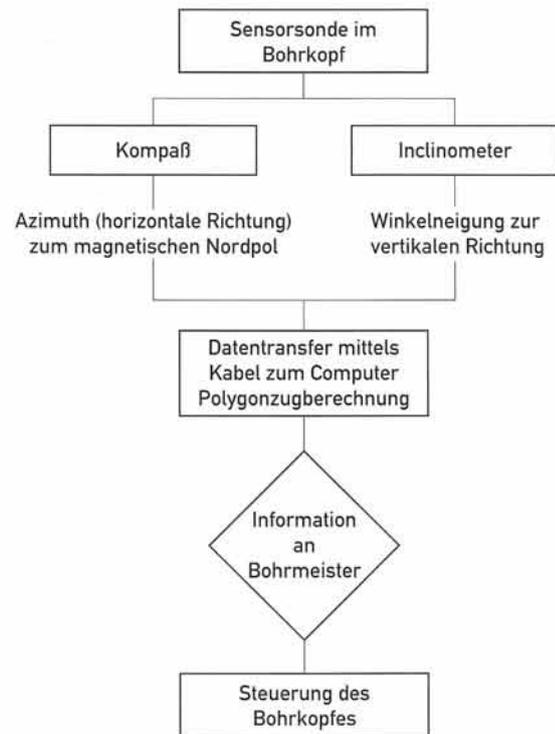


Bild 5. Vermessungsablauf für die Erdmagnet-Gravitationsfeldmessungen

Fig. 5. Survey sequence by using magnetic-gravitation tools

Tabelle 1. Vermessungssysteme für Horizontalbohrungen

Table 1. Drill guidance systems for Horizontal Directional Drilling

Bezeichnung	Beschreibung
1. Erdmagnet-Gravitationsfeld-Steuerung	<p>Horizontale Richtung/Lage:</p> <ul style="list-style-type: none"> • mittels Kompaß-Richtung zum Erdmagnetfeld • Störungsempfindlich durch E-Leitungen/Metallobjekte etc. <p>Vertikale Richtung/Tiefe:</p> <ul style="list-style-type: none"> • mittels Neigungsmesser-Richtung zum Erdgravitationsfeld <p>Lageberechnung: Polygonzugberechnung</p>
2. Tru Tracker (Künstliches Magnetfeld)	<p>Horizontale Richtung und Tiefe:</p> <ul style="list-style-type: none"> • mittels starkem künstlich erzeugtem Magnetfeld • Schleife – gerader Leiter – Gleichstrom • Messung der Magnetfeldstärke $H = I/2\pi r$, bzw. Induktion $B = \mu_0 H$ (siehe Bild 6) • störungsunempfindlich solange keine Metallobjekte zwischen Schleife und Sonde (Sensor) • Lageberechnung: Polygonzugberechnung
3. Kreiselkompaß (High speed finder)	<p>Horizontale Richtung und vertikale Neigung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • zwei separate, rechtwinklig zueinander angeordnete Kreisel (Navigationssystem für Flugzeuge, Schiffe, Raketen) • Wirkungsweise: mechanisches Prinzip • Störungsunempfindlich: praktisch keine Beeinflussung durch Magnetismus • Anwendung: <ul style="list-style-type: none"> • starke magnetische Störungen • Verlegung von Schleifen (True Tracker) durch Bebauung etc. unmöglich • Lageberechnung: Polygonzugberechnung
	Bemerkung: Systeme 1 und 2 werden meist parallel angewendet zur Steigerung der Genauigkeit

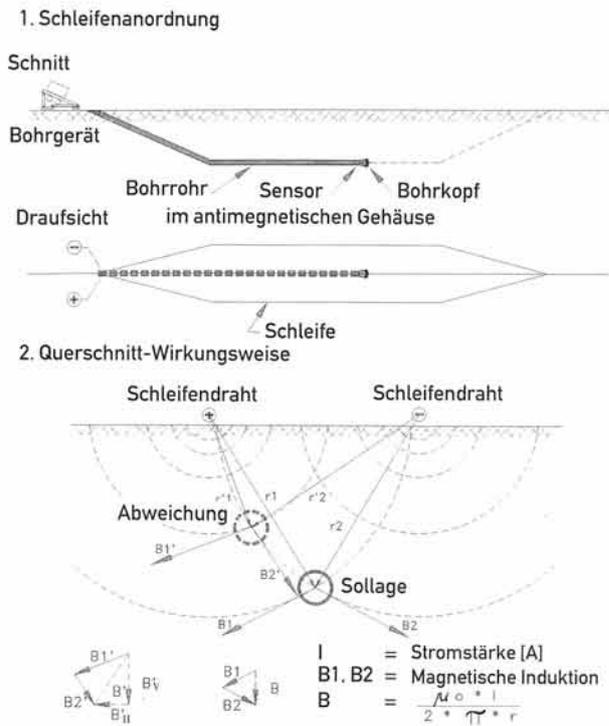


Bild 6. Prinzip des Tru Tracker Vermessungssystems [4]

Fig. 6. Principle of Tru Tracker survey system [4]

elektronischen Fühlern, verbunden mit einem isolierten robusten Kabel, das im Inneren des Bohrgerätes verläuft und die Informationen zum Kontrollrechner im Steuerstand überträgt (Bild 5). Die Messung wird pro eingepreßtem Rohrsegment der Länge S vorgenommen. Somit kann mittels einer Polygonzugsberechnung (Computer Programm) die Lage des Bohrkopfes bezogen auf die Bohrachse innerhalb von ca. ± 10 cm ermittelt werden. Die Genauigkeit hängt von der Bohrlänge ab, da sich die Fehler akkumulieren können. Die Erdmagnet- und Gravitationsfeldmessungen können durch magnetische Interferenz gestört werden. Daher wird zur Kontrolle eine zweite unabhängige Messung (wenn erforderlich) mittels Tru Tracker [3] durchgeführt.

Diese Methode beruht auf der Erzeugung eines Gleichstroms mittels einer Schweißmaschine mit hoher Stromstärke I und niedriger Spannung V, der in eine am Boden ausgelegte Schleife (gerader Leiter) eingespeist wird (Bild 6). Die Stromstärke I erzeugt im geraden Leiter ein Magnetfeld mit kreisförmigen Feldlinien der Feldstärke H (Tabelle 1). Die Feldstärke wird im Boden kaum verändert, da die Permeabilitätszahl μ_r ca. 1 ist. Im antimagnetischen Rohr hinter dem Bohrkopf wird die Abweichung der resultierenden Feldstärke durch Sensoren aufgenommen und über ein Galvanometer an den Rechner sowie an eine Anzeige am Steuerstand geleitet. Die Neigung des Rohres wird aus der Differenzmessung zweier im Abstand von ca. 3 m befindlichen Sensoren ermittelt.

Diese Methode ist unabhängig von der Bohrlänge und beträgt ca. ± 15 cm.

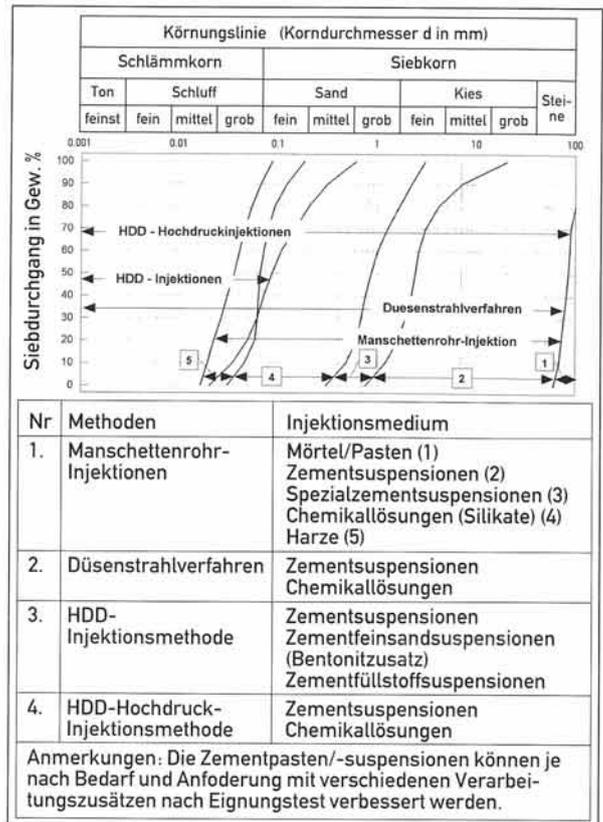


Bild 7. Anwendungsbereiche verschiedener Injektionsmethoden

Fig. 7. Application areas of various grouting methods

Wenn keine Schleife am Boden ausgelegt werden kann und wenn magnetische Störungen erwartet werden (Unterquerung von Flüssen mit naheliegenden metallischen Objekten, sowie unter dichter Bebauung in Städten), muß auf das Kreiselkompaßsystem zurückgegriffen werden. Die Probleme hinsichtlich der Genauigkeit sowie die Anforderung an solche Systeme, die aus der Steuerungstechnik für Schiffe, Flugzeuge und Raketen entwickelt wurden, sind in [4] beschrieben. Die Zuverlässigkeit solcher Systeme ist sehr hoch, bedarf allerdings Spezialisten für die Durchführung und Auswertung der gewonnenen Vermessungsdaten.

4 Neue Anwendungsgebiete im Ingenieurbau

4.1 HDD-Injektionsmethode: Zementstabilisation des Bentonit-Bohrklein-Gemisches der auf-gebohrten Röhren

4.1.1 Einführung

Die Anforderungen zur Verbesserung der Verkehrstechnik innerhalb existierender städtischer Ballungsgebiete der entwickelten und sich entwickelnden Länder, besonders in Asien, nehmen stark zu. Da die bestehende Bebauung nicht immer großflächig der Abrißbirne zum Opfer fallen kann, wird der Markt für Untergrundbahnen steigen. Um die bestehende Bebauung gegen Setzungen während des Tunnelausbaus zu schützen, werden oft Schutzschilde um den zukünftigen Tunnel durch Bodeninjektionen gebil-

Tabelle 2. Chemische Bodenstabilisierungsmethoden
Table 2. Chemical soil stabilization methods

Injektionstechnik	Einpreßmittel [3]	Beschreibung
1. Manschettenrohr-Methode	<ul style="list-style-type: none"> • Lösungen • Emulsionen • Suspensionen • Pasten, Mörtel 	<ul style="list-style-type: none"> • Vertikale und geneigte Bohrungen • Füllen bestehender Poren (Zementierung) • z. B. Zementsuspension: 100–500 kg/m³ Zement • z. B. Zementsuspension: 10–60 kg/m³ Betonite • Injektionsdruck 5–30 bar • Anwendungsbereich siehe Bild 7 • Festigkeiten 2–20 MN/m²
2. Düsenstrahlverfahren (Jetgrouting-Hochdruckinjektion)	<ul style="list-style-type: none"> • Suspensionen 	<ul style="list-style-type: none"> • Vertikale und geneigte Bohrungen • Soil-Frakturierung-Verfahren = Aufschneiden der Bodenstruktur und Vermischen mit Zementsuspension • Boden-Zementkörper • z. B.: Zementsuspension: 150–550 kg/m³ Zement • Injektionsdruck 100–700 bar • Anwendungsbereich in allen Bodenarten • Festigkeiten: 10–20 MN/m² • Wichte: 16–20 kN/m³ • Gefahr Bodenhebungen
3. HDD-Injektionsmethode	<ul style="list-style-type: none"> • Suspensionen • Pasten 	<ul style="list-style-type: none"> • Horizontale und geneigte Bohrungen • In-situ-Stabilisation des Bentonit-Bohrklein-Wasser-Gemischs • Boden-Zementkörper • z. B. Zementsuspension: 450–550 kg/m³ Zement • Injektionsdruck 5–30 bar • Anwendungsbereich siehe Bild 7 • Festigkeiten 10–60 MN/m² • Wichte: 12–14 kN/m³
4. HDD-Hochdruckinjektionsmethode	<ul style="list-style-type: none"> • Suspensionen 	<ul style="list-style-type: none"> • Horizontale und geneigte Bohrungen • Soil-Frakturierung-Verfahren • Charakteristik siehe Düsenstrahlverfahren

det. Ferner werden immer häufiger Abdichtungsschürzen unter bestehenden Deponien gebaut, um das weitere Kontaminieren tieferer Bodenschichten durch toxische Stoffe zu verhindern.

Die vertikale Hochdruckinjektionstechnik wird hier relativ effektiv und wirtschaftlich für solche Fälle eingesetzt. In Fällen, in denen die Zugänglichkeit nicht möglich ist, müssen andere Techniken benutzt oder entwickelt werden. In Tabelle 2 sind die gebräuchlichsten vertikalen Methoden und die neu entwickelten patentierten horizontalen Methoden gegenübergestellt.

4.1.2 Prinzip der HDD-Injektion

Das Prinzip der Vermischung des Bentonit-Bohrklein-Wasser-Gemischs (B-B-W-Gemisch) mit Zementsuspension beruht auf der kontrollierten Verdüsung/Verwirbelung der Suspension im Mischwerkzeug in der vorgebohrten Röhre (Bild 2; Vermörtelung) und hat folgende Wirkungsweise:

1. Die Gelfestigkeit [5, Bild 10, 11, 12] des B-B-W-Gemischs wird gebrochen und das Gemisch verflüssigt.
2. Das verflüssigte B-B-W-Gemisch wird innerhalb der Trommel intensiv, turbulent mit der einge-

spritzten Zementsuspension hydrodynamisch vermischt.

3. Innerhalb der Trommel wird ein Großteil der Energie aufgebraucht durch die Abstrahlung an der Trommel und die Verwirbelung.
4. Der bereits injizierte Teil der Röhre (hinter dem Mischwerkzeug) wird durch den aufgebauten leichten Druck vom Abfließen geschützt.
5. Das rotierende Bohrgestänge (Rohr) bricht die Gelschubfestigkeit des B-B-W-Gemischs. Die drückende Längsspannung entspannt sich in eine vorwärts gerichtete Strömung.

Die Strömungsmasse der eingespritzten Zementsuspension ist gleich der Masse des laminar ausströmenden B-B-W-Gemischs entlang des Bohrgestänges gemäß der Kontinuitäts- und *Hagen-Poiseuille*-Beziehung der Hydrodynamik (Bild 8).

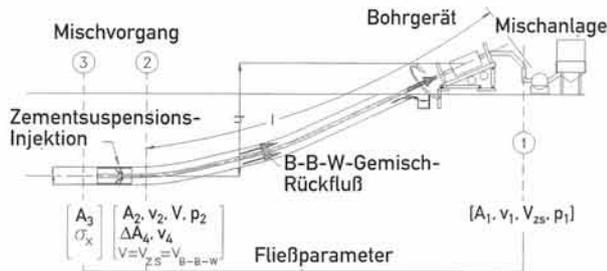
Nach durchgeführten Messungen beträgt der aufgebaute Druck ca. 1,6 bis 3 m Wassersäule (0,16 bis 0,3 bar).

4.1.3 Mischkonzept

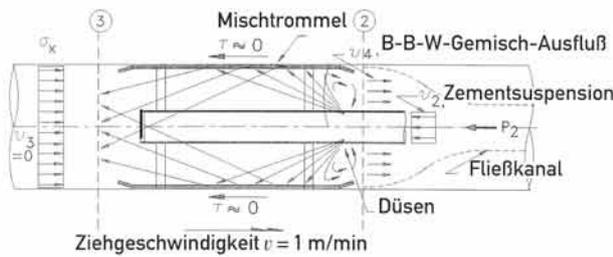
Das Mischkonzept ist von verschiedenen Parametern abhängig, wie z. B.:

- Feststoffmatrix des B-B-W-Gemischs

1. Misch- und Fließvorgang



2. Strömungs- und Spannungsmodell im Bereich der Trommel



2. Aus den bekannten Beziehungen ergibt sich:

Kontinuität : $V_{zs} = A_1 v_1 = A_2 v_2$

Bernoulli : $\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} (1 + \zeta) + \frac{p_2}{\rho g} + h$

Impuls : $\rho (-A_3 v_3^2 - \Delta A_4 v_4^2 + A_2 v_2^2) = p_2 A_2 - \sigma_x A_3$

Druckzuwachs : $\sigma_x = \frac{A_2}{A_3} (p_1 - \rho g h - \Delta p + \rho \frac{\Delta A_4}{A_2} v_4^2 - \rho v_2^2)$

Bild 8. Prinzip der HDD-Injektionstechnik
Fig. 8. Princip of HDD-Grouting Method

- Anteil Bentonit /Ton/Schluff
- Dichte und verlangte Festigkeit, etc.

Das Mischrezept wird ferner beeinflusst von den Kosten für Zement, Füllstoffe und andere Zusätze.

Aufgrund gegebener Randbedingungen wurde für die Entwicklung dieser Methode nur Zement verwendet. Weitere Modifikationen werden der Zukunft vorbehalten bleiben. Auf dieser Basis wurde über theoretische Feststoffbestimmung ein Mischrezept unter der Annahme eines Variationsbandes für das B-B-W-Gemisch entwickelt.

In umfangreichen Versuchsserien wurden entnommene Bodenproben mit Bentonit-Suspension vermischt und die Dichte des B-B-W-Gemisches variiert und mit den angenommenen Zementmengen (Bild 9) versetzt.

Aus Sedimentationsversuchen wurde der w/z-Gehalt der Zementsuspension bestimmt, der zwischen w/z = 0,45 und 0,75 liegen kann. Allerdings ist der untere Wert günstiger für die Verarbeitung. Das B-B-W-Gemisch in der Bohrröhre (in der Schicht des weichen schluffigen Tons) hat eine durchschnittliche Dichte von $\rho = 1,35$. Daher sind rund 500 kg Zement pro m^3 B-B-W-Gemisch erforderlich. Das ergibt ein w/z-Gehalt von ca. 1,4 in der fertig injizierten Bohrröhre und folgende Stoffbilanz:

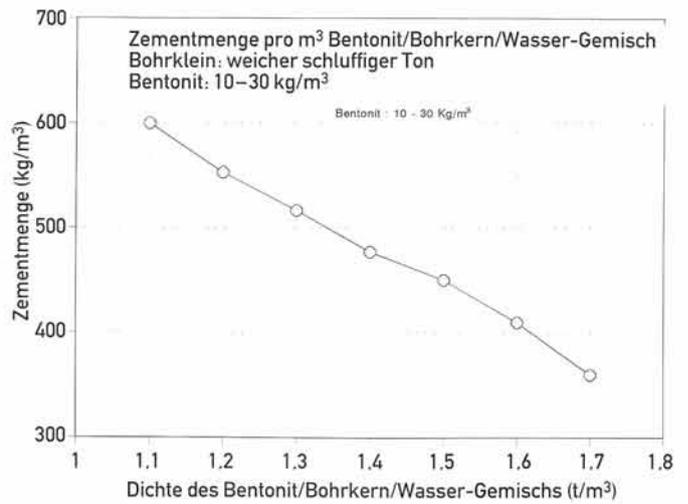


Bild 9. Korrelation zwischen Bentonit-Bohrkern-Wasser-Gemischdichte und Zementzugabe
Fig. 9. Correlation between bore mud density and cement dosage

Wasser:	679 l/m ³	679 kg/m ³
Bentonit:	6 l/m ³	15 kg/m ³
Weicher schluffiger Ton:	123 l/m ³	320 kg/m ³
Zement:	192 l/m ³	500 kg/m ³
	1000 l/m ³	1514 kg/m ³

4.1.4 Arbeitsablauf

Zur Injektion sind folgende zusätzliche Komponenten erforderlich:

- Mischstation
- Pumpaggregate
- Zementsilos mit Absaugeinrichtung und Meßeinrichtungen etc.
- Untergrundmischwerkzeug: Verwirbelungstrommel mit oder ohne Mischschaufeln.

Nach Beendigung der Aufräusung der Röhre wird am Ende der Bohrröhre das Mischwerkzeug, bestehend aus drei Einspritzdüsen, in äquidistanten Abständen am Rohrumfang verteilt, mit einer Verwirbelungstrommel durch zwei Reihen ventilatorförmig angeordneter Streben am Rohr und einem Nachlaufrührwerk verbunden.

Das Rohr mit Mischwerkzeug wird einige Meter in die vorgebohrte, mit Bentonit-Bohrkern-Wasser-Gemisch gestützte Bohrung gezogen. Mit einem Bagger wird die Röhre verschlossen, um eine Pfropfenwirkung zu erzeugen.

Die Zementsuspension wird in der Mischanlage hergestellt und unter hohem Druck (Bild 10) in die Verwirbelungstrommel gespritzt. Der Rohrstrang mit dem Mischwerkzeug wird dabei unter gleichmäßiger Zuggeschwindigkeit von ca. 1 m/min und gleichmäßiger Drehung von ca. 60 U/min ohne Verlängerung des Endrohrstrangs durch die Bohrröhre gezogen.

4.1.5 Kontrolle des Injektionsvorgangs

Nachdem die Mischung der Injektion gemäß Bodenart und Festigkeit abgestimmt ist, müssen folgende

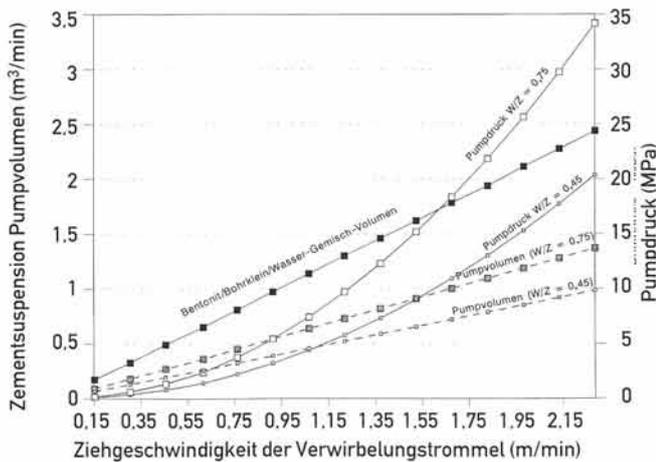


Bild 10. Verhältnis zwischen Zementsuspensionszu-
gabe, Stützflüssigkeitsmenge, Pumpdruck und Zieh-
geschwindigkeit der Verwirbelungsmischtrommel

Fig. 10. Relation between cement suspension dosage,
bore mud volume, pump pressure and pull velocity of
in tube mixing tool

Parameter während der Zementsuspensionsinjektion
kontrolliert werden:

- Flußmengenmessung der Zementsuspension hinter
der Pumpe
- Geschwindigkeitsmessung der gezogenen Verwir-
belungstrommel

Diese Messungen werden in einem Steuercom-
puter [6] zusammengefaßt. Die Abgabemenge an
Zementsuspension wird proportional zu der Zieh-
geschwindigkeit bestimmt und gesteuert. Die Menge
der eingespritzten Zementmenge pro m^3 Bentonit-
Bohrklein-Wasser-Gemisch ist konstant gemäß dem
ermittelten Mischungskonzept.

Ferner wird die austretende Menge an Bentonit-
Bohrklein-Wasser Gemisch, die in eine Auffang-
grube am Bohrlochanfang läuft, in einem Zulauf-
kanal mit bekanntem Querschnitt gemessen.

Aufgrund der Kontinuitätsbeziehung der Hyro-
dynamik muß die Menge gleich der injizierten Zement-
suspensionsmenge sein.

Der Injektionsvorgang ist diskontinuierlich,
weil nach dem Ziehen jeweils einer Rohrlänge ein
Rohr von der Leitung abgeschraubt werden muß.
Während dieser Zeit kann nicht injiziert werden. In
der Röhre ist ein leicht fallender Druckgradient vom
Mischwerkzeug zum Bohrlochanfang vorhanden.

Dies kann bewirken, daß der injizierte Grenzbe-
reich beginnt, in den nicht injizierten Bereich zu „fil-
trieren“ (Verdünnung der Mischung). Daher wird
nach Abschlagen des Rohrs das Mischwerkzeug
nochmals 30 bis 70 cm zurückgedrückt in den be-
reits injizierten Bereich, um eine volle Überlappung
und Kontinuität zu gewährleisten. Dann beginnt er-
neut der Einspritzvorgang über die Länge eines
Rohrsegments. Dieser Vorgang wird so oft wieder-
holt, bis die Mischtrommel die Erdoberfläche am
Bohrlochanfang erreicht.

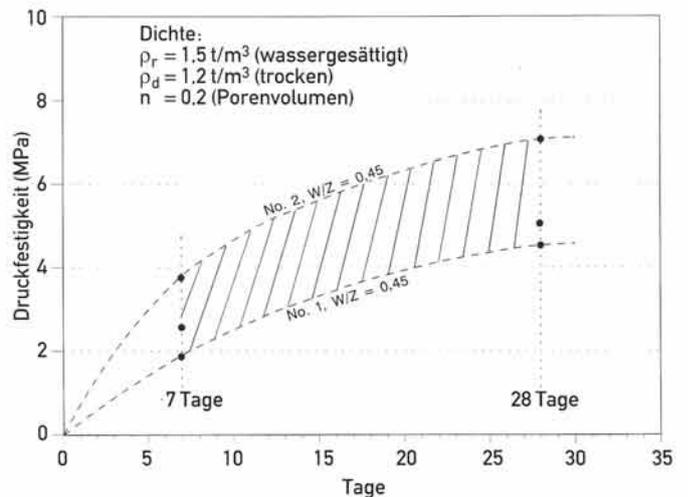


Bild 11. Festigkeitsentwicklung der stabilisierten
Röhren

Fig. 11. Compressive strength development of cement-
mud stabilised tubes

4.1.6 Ergebnisse

Zur Überprüfung des Konzepts wurden in einem Test
drei nebeneinander angeordnete überschnittene
Röhren (wie bei einer Bohrpfehlwand) in einer Tiefe
von 6,10 m innerhalb einer weichen schluffigen Ton-
schicht hergestellt. Nach Beendigung des Tests wur-
den die Röhren freigelegt und Kernbohrungen gezo-
gen sowie Vermessungen durchgeführt. Die
Ergebnisse der Vermessungen bestätigen die Ge-
nauigkeit des Bohrverfahrens. Die gezogenen Bohr-
kerne wurden nach Altersstufenentwicklung getestet
(Bild 11). Die Festigkeiten zeigten relativ starke
Schwankungen, lagen jedoch in zufriedenstellender
Größenordnung am oberen Bereich für Hochdruck-
injektionen. Die Dichte der wassergesättigten
Proben beträgt ca. $\rho_r = 1,5 \text{ t/m}^3$. Mit einem
Porenanteil $n \approx 20\%$ ergibt sich eine Trockendichte
von ca. $\rho_d = 1,2 \text{ t/m}^3$.

4.2 HDD-Hochdruckinjektionsmethode

Die HDD-Injektionstechnik, bereits in Abschn. 4.1
beschrieben, produziert wie jede Bohrtechnik, die
mit Bohrfüssigkeit arbeitet, erhebliche Massen an
Bentonit-Bohrklein-Wasser-Gemischabfall. Dieses
Gemisch wird am Eintritt und Austritt der Bohrung
aufgefangen, einer Schlammbehandlungsanlage zu-
geleitet und umweltverträglich aufbereitet. Die
Durchschnittsmengen des Abfallgemischs während der
verschiedenen Bohrphasen (Soil Fracturing) und der
Vermörtelungsphase (Verdrängung) betragen:

Pilotbohrung $\varnothing 9''$	0 m^3/m
Aufweitungsbohrung $\varnothing 36''$	0,18 m^3/m
Aufweitungsbohrung $\varnothing 42''$	0,21 m^3/m
Aufweitungsbohrung $\varnothing 54''$	0,35 m^3/m
Vermörtelung (Zement- suspensionsinjektion)	0,60 m^3/m

Das Raumgewicht des B-B-W-Gemischs liegt
zwischen $\rho = 1,25\text{--}1,5 \text{ t/m}^3$, das ergibt einen Fest-
stoffabfall von ca. 570 kg/m^3 .

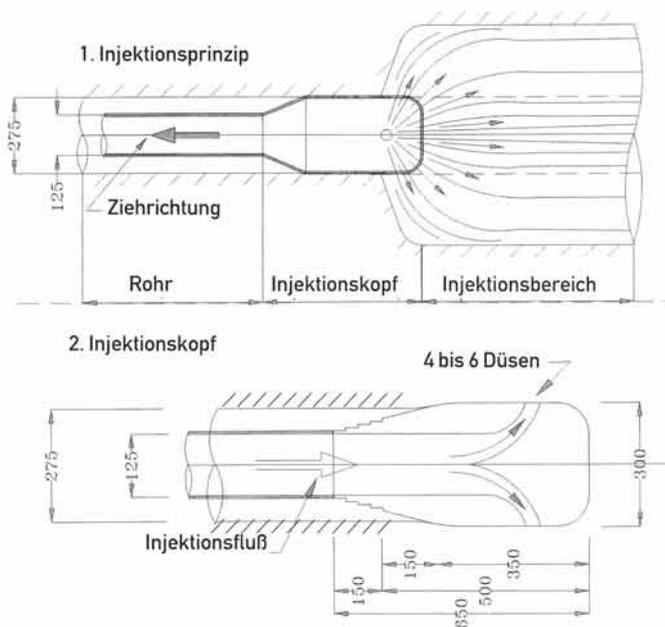


Bild 12. Prinzip der HDD-Hochdruckinjektionsmethode

Fig. 12. Principle of HDD-High pressure grouting method

Ferner werden zur Stabilisierung des Bentonit-Bohrklein-Wasser-Gemischs erhebliche Mengen an Zement benötigt. Die Menge an Zement ist kaum zu verringern aufgrund der verdünnten Feststoffmatrix des B-B-W-Gemischs, bedingt durch die Verdünnung der Bentonitsuspension während der Bohrvorgänge. Die Zementmenge kann noch weiter optimiert werden durch Zugabe von Stäuben (Füller) etc. Dies führt jedoch nur zu einer Variation mit ziemlich kleiner Bandbreite. Die vom Verfasser konzipierte HDD-Hochdruckinjektionstechnik optimiert nicht die Technik, sondern stellt eine nächste Stufe der Entwicklung dar (Bild 12). Die möglichen Vorteile dieser Technik sind:

1. Gleiche Bohrausrüstung, wie in Abschn. 2 beschrieben, kann eingesetzt werden. Die Aufweitungsbohrköpfe werden jedoch nicht benötigt.
2. Die gleiche Injektionsgeräteausrüstung, wie in Abschn. 4.1.4 beschrieben, kann eingesetzt werden. Statt der Verwirbelungstrommel wird ein Injektionskopf benutzt (Bild 12),
3. Kein Bentonit-Bohrklein-Wasser-Gemisch fällt an, somit ist keine aufwendige Schlammbehandlung erforderlich.
4. Durch die Zementsuspension-Hochdruckinjektion wird der umgebende Boden während der Rotation und der kontinuierlichen Vorwärtsbewegung des Bohrgestänges aufgebrochen und verflüssigt. Während dieses Vorgangs wird ein Großteil der Bodenporen mit Zementsuspension gefüllt sowie das Grundwasser teilweise verdrängt.

Dieser Prozeß unterscheidet sich von der HDD-Injektionsmethode dadurch, daß hier nur das Porenvolumen mit Zementsuspension gefüllt wird.

Damit verringert sich die Zementmenge auf 100 bis 300 kg/m³ Boden. Durch die Verringerung der Zementmenge und die Ausschaltung von größeren Mengen an Bodenschlamm wird diese neue Technik sehr wettbewerbsfähig.

Die Nachteile dieser Methode sind vergleichbar mit der vertikalen Hochdruckinjektionstechnik und bestehen in

- Druckanstieg im Boden verbunden mit möglichen Hebungen
- Durchmesser des stabilisierten Bodenkörpers ist je nach Bodenart stärkeren Schwankungen unterworfen als bei der HDD-Injektionstechnik mit gleichmäßig kreisrunden, vermörtelten Bodenhöhren.

5 Zusammenfassung

Die neuen horizontalen Injektionstechniken bilden eine Ergänzung bestehender Techniken. Diese neuen Techniken erfüllen die heutigen Erfordernisse im Bereich von Sanierungen, Umweltschutz sowie im Tunnelbau unter dichtbesiedelten städtischen Gebieten. Der Bericht zeigt auf, wie durch Synergieeffekte neue Techniken entstehen und wie Verbesserungen nicht nur durch Optimierung bestehender Techniken möglich werden, sondern Entwicklungssprünge werden durch Systematisierung der Nachteile und Infragestellen von Techniken erreicht.

Literatur

- [1] Fahrlach Tunnel Mannheim Southern Bypass Central Section, Faltblatt, 1985, Bilfinger + Berger, Mannheim.
- [2] Blaser, J.: Steuerbare Horizontalbohrtechnik – Eine Alternative zur konventionellen Herstellung von Dückern im Leitungsbau. bbr Wasser- und Rohrbau 41 (1990), Heft 3, S. 119–125.
- [3] Caspary, G. T., Agnew, J.: Guidance Systems, Firmeninterne Presentation, Sharewell, Inc. 13383 Murphy Road, Stafford, TX 77477, USA.
- [4] Lampert, R.: Gyroscopic Borehole Guidance, 1993, Firmeninterne Presentation, Scientific Drilling, 3025 Buena Vista Drive, Paso Robles, CA 93446, USA.
- [5] Grundbau Taschenbuch 4. Aufl., Teil 2, 1991, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- [6] Sales & Service Catalog (Grouting of Oilwells), 1992, Halliburton Services, 2700 Post Oak Boulevard, Huston, TX 77056, USA.
- [7] Arz, P., Schmidt, H. G., Seitz, J., Semprich S.: Grundbau, Sonderdruck aus dem Beton-Kalender 1994, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- [8] Becker, E.: Technische Strömungslehre, 1974, Verlag B. G. Teubner Stuttgart.
- [9] Bonzel, J., Dahms, J.: Über den Einfluß des Zements und der Eigenschaften der Zementsuspensionen auf die Injizierbarkeit in Lockergesteinsböden, 1972, Beton-Verlag Düsseldorf.

Autor dieses Beitrages:

Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid, Projektmanager Asia Branch, Bangkok, Thailand. Bilfinger + Berger Bauaktiengesellschaft, Hauptniederlassung Ausland Wiesbaden, Gustav-Nachtigal-Straße 3, Postfach 1509, 65189 Wiesbaden