

HDD – Horizontal Directional Drilling Druckbedingte Schadensereignisse bei Pilotbohrungen

G. Girmscheid, B. Schaiter, K. Schetelig

Zusammenfassung Die detaillierte Analyse von möglichen Schadensszenarien bei der Anwendung des HDD-Verfahrens und die Entwicklung von Strategien zur Schadensvermeidung bzw. -minimierung bekommen eminente Bedeutung in Hinblick auf die steigende Anwendung des HDD-Verfahrens und die doch relativ hohe Schadenshäufigkeit. Dieser Artikel konzentriert sich auf Schadensereignisse, die „externe“ Auswirkungen zeigen, wie Geländehebungen, Einbrüche, Suspensionsaustritte etc. – d. h. die zur Beeinträchtigung von Anrainern, benachbarter Bebauung oder Infrastruktureinrichtungen führen. Der Fokus liegt hierbei auf möglichen Schadensereignissen im Zuge der Herstellung der Pilotbohrung, ausgelöst durch verfahrensbedingt hohe Suspensionsdrücke. Aufgezeigt werden die Zusammenhänge der Fachdisziplinen Geologie, Geotechnik, Hydraulik und Verfahrenstechnik sowie die Notwendigkeit einer disziplinenübergreifenden Koordination zur risikooptimierten Gestaltung des Erstellungsprozesses. Mit einem besseren Verständnis für die verfahrensbedingten Herstellungsrisiken bei Anwendung des HDD-Verfahrens erhalten Bauherren die Möglichkeit, in der Bauvorbereitungsphase notwendige Erkundungsmaßnahmen zielgerichteter zu planen und rechtzeitig Fachleute für HDD-Verfahren einzuschalten. Diese Basis ermöglicht dem Planer eine fundierte Projektbearbeitung, sensibilisiert die an der Ausführung Beteiligten auf potentielle Schadensereignisse und bildet die Basis für die Erstellung von Maßnahmenplänen, die ein rechtzeitiges Eingreifen schon bei sich ankündigenden Ereignissen erlauben.

HDD – Horizontal Directional Drilling Pressure related failures caused by pilot drilling operations

Abstract In view of the growing use of HDD and the still relatively high frequency of damages, a detailed analysis of possible damage scenarios when using HDD and the development of strategies to avoid or minimize damages are becoming

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid

Vorsteher des Instituts für Bauplanung und Baubetrieb
ETH Zürich, CH-8093 Zürich
girmscheid@ibb.baug.ethz.ch

Dr.-Ing. Bernhard Schaiter,

Oberassistent am Institut für Bauplanung und Baubetrieb
ETH Zürich, CH-8093 Zürich
schaiter@ibb.baug.ethz.ch

Prof. Dr.rer.nat. Kurt Schetelig

Ingenieurbüro Heitfeld – Schetelig, Beratende Geologen und Ingenieure GmbH
Preusweg 74, D-52074 Aachen
info@ihs-online.de

eminently important. This article focuses on the damage incidents that cause “external” impacts, such as surface deformation, cave-ins, suspension leakages, etc., which adversely affect neighbors, adjacent buildings or infrastructure. Focus is on possible damage incidents that arise during the pilot drilling operation and are caused by the high levels of drill mud pressure necessitated by the process. The interrelationships between the expert disciplines of geology, geotechnics, hydraulics and process engineering are revealed, as is the necessity of cross-disciplinary coordination to ensure the risk-optimized structuring of the production process. As clients better understand the process related production risks associated with HDD, they are able to specifically plan the exploratory measures needed during the construction preparation phase and to involve HDD experts in good time. This basis enables the planner to thoroughly plan the project and raises the awareness of the delivery team in terms of possible damage incidents, thus enabling action plans to be drawn up to ensure prompt intervention as soon as incidents are signaled.

1 Einleitung

Der grabenlose Rohrleitungsbau und der grabenlose Bau von erdverlegten Kabeltrassen haben in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Grund dafür ist die immer dichter werdende Bebauung unserer Siedlungsgebiete, sowohl über- als auch unterirdisch. Als besonders vorteilhaft erweist sich der grabenlose Leitungsbau bei der Querung von Straßen, Eisenbahnlinien oder Wasserläufen. Aber auch ökologisch sensible Zonen können mit Hilfe des HDD-Verfahrens umweltschonend gequert werden. Die kontinuierliche Steigerung des Anteils der mittels HDD hergestellten Leitungstrassen während der vergangenen 20 Jahre ist auch auf die wirtschaftlichen Vorteile für die Bauherren zurückzuführen. Dieser Vorteil wirkt sich besonders stark aus bei Projekten, die zu einer starken Störung der Verkehrsflüsse führen würden, Beeinträchtigungen des Geschäftsverkehrs nach sich ziehen würden sowie bei Leitungen, die nach Fertigstellung der Leitungstrasse einen großen Aufwand zur Wiederherstellung der schon bestehenden Infrastruktureinrichtungen erfordern würden. Weiters ist bei Leitungen in Tiefen von mehr als 3 Metern, im Durchmesserbereich von DN 150 bis DN 1500, und hier insbesondere bei längeren Leitungsträngen ein Kostenvorteil gegenüber der konventionellen offenen Bauweise, aber auch gegenüber anderen grabenlosen Bauverfahren gegeben. Besonders dieser offensichtliche Kostenvorteil hat viele Bauherren dazu bewogen, dieses doch relativ neue Bauverfahren rasch zur bevorzugten Bauweise im kommunalen Bereich sowie bei diversen Querungen von Straßen und Bahnlinien zu machen. Dieses, im Vergleich zu anderen Sparten des Bauwesens, überproportionale Wachstum des HDD-Marktes hatte zur Folge, dass HDD plötzlich von einer Vielzahl von Unterneh-



Bild 1. Pilotbohrkopf mit einseitiger Abschrägung zur Steuerung
Fig. 1. Asymmetrical drill bit for the directional control of pilot drilling operations

men angeboten wurde. Bei dieser anfänglichen Euphorie auf Bauherrn- und Unternehmerseite wurde leider oftmals übersehen, dass es sich beim HDD-Verfahren mit Mud-Motor-Bohrkopf um ein aus der Tiefbohrtechnik des Erdölwesens für die Anwendung im oberflächennahen Bereich für horizontale Bohrungen adaptiertes Bauverfahren handelt. Aufgrund der völlig unterschiedlichen Randbedingungen resultieren verfahrensbedingt Risiken, die einer vertieften Betrachtung bedürfen. Die hohe Komplexität, bedingt durch die Interaktion zwischen Baugrund und Bauverfahren sowie externen Randbedingungen, erfordert ein gesteigertes Maß an Koordination und Kooperation der einzelnen Fachdisziplinen. Nachfolgend werden, nach einer kurzen Beschreibung des HDD-Verfahrens, die primären verfahrensbedingten Risiken bei der Herstellung von HDD-Pilotbohrungen analysiert sowie Wege zur Eingrenzung dieser Risiken aufgezeigt.

2 HDD-Verfahren

2.1 Herstellungsablauf

Beim HDD-Verfahren gliedert sich die Herstellung des endgültigen Bohrdurchmessers in mehrere Schritte [1] [2]. Erster Arbeitsschritt ist die Herstellung der Pilotbohrung. Die Steuerung wird beim Mud-Motor-getriebenen Rollenmeißelbohrkopf (Bild 3) durch das ca. 2 m lange Bohrkopfsegment, das ca. 1° – 2° gegenüber der Bohrachse abgewinkelt ist, sowie beim meißelförmigen Bohrkopf mit Hochdruckspüldüsen (Bild 1) durch die einseitige Abschrägung ermöglicht. Durch Stoppen der Drehbewegung des Bohrgestänges in einer definierten Achsstellung und Fortsetzung des Bohr- bzw. Pressvorganges (ohne Rotation), ergibt sich die Möglichkeit der Steuerung des

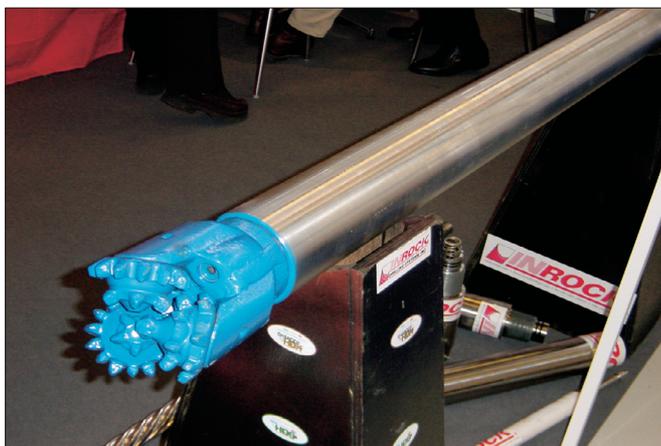


Bild 3. Mud-Motor mit Rollenmeißel
Fig. 3. Mud Motor with roller bit



Bild 2. Aufweitungsbohrkopf
Fig. 2. Backreamer

Bohrstranges in die gewünschte Richtung. Durch kontinuierliches Drehen des Bohrgestänges wird die Asymmetrie des Bohrkopfes aufgehoben und so eine geradlinige Bohrung ermöglicht. Die Lage des Bohrkopfes kann mittels magnetischem Kompass, Induktionsschleifen oder Kreiselkompass ermittelt werden, die in einem antimagnetischen Gehäuse hinter dem Bohrkopf angeordnet sind [1].

Nach dem Erreichen des Zielpunktes wird an das Pilotgestänge ein Aufweitungskopf angebracht. Ab nun wird zum Startpunkt hin zurückgezogen, gleichzeitig wird am Zielpunkt das Gestänge verlängert und am Startpunkt abgeschlagen. Zur Erzielung des Endquerschnittes sind, abhängig vom Durchmesser und der Geologie, meist mehrere Aufweitungsbohrungen notwendig. Ab der zweiten Aufweitung wird vor dem Aufweitungsbohrkopf (Bild 2) ein Führungskörper eingesetzt zur Sicherung der symmetrischen Aufweitung um die Sollachse. Das Pilotgestänge dient als Zugstange. Der Aufweitungskopf vergrößert den durch das Pressen bzw. Bohren des Pilotgestänges entstandenen Hohlraum. Im Nachlauf werden die Medienrohre eingezogen, d.h. das Pilotgestänge fungiert als Zugstange zum Einziehen der Rohre und wird in der Startbaugrube wieder geborgen [1].

2.2 Asymmetrischer Meißelbohrkopf mit Spüldüsen

Bei Bohrungen im Lockergestein kommen, abhängig von der Lagerungsdichte, asymmetrisch abgeschrägte, meißelförmige Bohrköpfe oder Hartmetallfinger mit Spüldüsen (Bild 1) zur Anwendung. Diese Bohrköpfe sind mit Hartmetallnoppen oder Hartmetallfingern besetzt und weisen Spülöffnungen auf, über die Bentonitsuspension eingepresst wird, wodurch der Boden unmittelbar vor dem Bohrkopf verflüssigt wird, das Bohrklein durch den Ringraum ausgetragen wird und eine Stützung der Bohrlöchwandung über die gesamte Bohrlänge erreicht wird.

Bei Lageabweichungen wird der einseitig abgeschrägte Kopf durch Drehen des Gestänges so ausgerichtet, dass eine Richtungskorrektur beim weiteren Vorpresen bewirkt wird [1]. Zum Erstellen einer geraden Leitung muss das Gestänge kontinuierlich während des Vortriebes gedreht werden (polygonartiger Vortrieb). Auf diese Weise kann der Vortrieb kontrolliert bis zum Zielpunkt geführt werden.

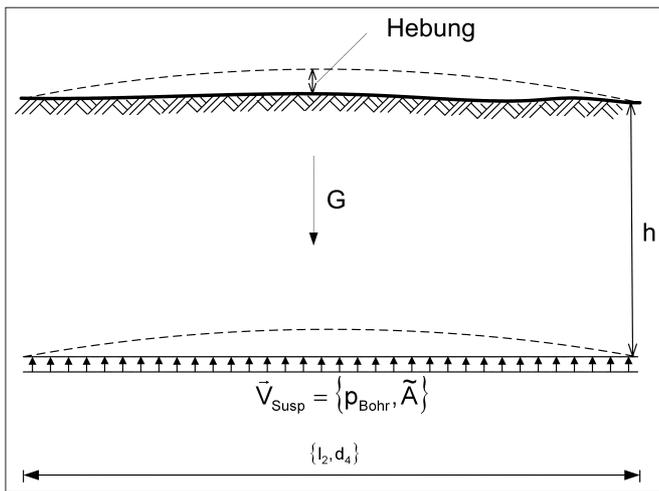


Bild 6. Hebungerscheinung infolge großflächigem Suspensionsverlauf in Klüft- oder Bankfugensystemen (Bild 8)
 Fig. 6. Surface deformation caused by large area drill mud flow in jointed rock (see also fig. 8)

Hebungskraft am Bohrkopf:

$$V_{\text{Susp}} = A_{\text{Susp}} \cdot p_{\text{Bohr}} \quad A_{\text{Susp}} \dots \text{Druckangriffsfläche über dem Bohrkopf}$$

Gewichtskraft des Bruchkörpers:

$$\bar{G} = \gamma \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{h^3}{(\tan \vartheta)^2}$$

Horizontaler Erddruck auf eine Bruchkörperseite:

$$e_{\text{ah}} = \gamma \cdot h \cdot K_{\text{ah}}$$

$$E_{\text{ah}} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot K_{\text{ah}} \cdot h^2$$

Im ungestörten System wirkt der Ruhedruck E_{oh} . Da jedoch beim Eintreten des Bruches der aktive Erddruck maßgebend wird, erfolgt hier die Berechnung mit E_{ah} , womit die Berechnung auf der sicheren Seite liegt.

Bei Betrachtung der Phase des Brucheintritts wirken in der Scherfläche des Silokörpers folgende Widerstände:

$$\tau = \tan \varphi \cdot \sigma(G, E_{\text{ah}}) + c$$

Mantelreibungskraft an einer Bruchkörperseite:

$$R_V = \tau \cdot \frac{M}{4} \cdot \sin \vartheta \quad M \dots \text{Mantelfläche der Pyramide}$$

$$R_V = \tau \cdot \frac{h^2}{\tan \vartheta}$$

Bei normalem Suspensionsrücklauf, d.h. kein Verlaufen von Suspension in Bankfugen oder Klüften, ergibt sich die Druckangriffsfläche A wie folgt:

$$A_{\text{Susp}} \approx d_1^2$$

Akute Hebungsgefahr ist gegeben, wenn:

$$\bar{V}_{\text{Susp}} = A_{\text{Susp}} \cdot \bar{p}_{\text{Bohr}} > \bar{G} + 4 \bar{R}_V$$

Hieraus kann $h_{\text{krit}} = f(p_{\text{Bohr}}, G, \varphi, c)$ bestimmt werden.

b) Verlaufen der Suspension in Bankfugen und Ausbildung eines großflächigen Druckkissens mit einhergehenden Hebungen

Dieser Fall wird wirksam, wenn das Verhältnis von Ausdehnung der Druckangriffsfläche (Bereich, über den die Suspension in der Bankfuge verlaufen ist) zu Überlagerung sehr groß ist (Bild 6). Hier treten, im Unterschied zu Fall a), keine Brucherscheinungen bzw. Bruchkörper auf, sondern es kommt zu einer großflächigen Hebung (plastische Verformung) meist außerhalb der Bohrkopflokalität.

Hebung:

$$\bar{V}_{\text{Susp}} > \bar{G}$$

$$V_{\text{Susp}} = p_{\text{Bohr}} \cdot A$$

Die wirksame „Kolbenfläche“ des Druckkissens ergibt sich zu (Bild 8):

$$A = \alpha \cdot \int_0^{l_2} \int_0^{d_4} dx dy$$

α ... Abminderungsfaktor für wirksame Hebellfläche (projizierte Fläche)

d_4 ... Ausdehnung des Druckkissens in x-Richtung

l_2 ... Ausdehnung des Druckkissens in y-Richtung

Gewicht der Überdeckung der wirksamen „Kolbenfläche“:

$$G = \gamma \cdot h \cdot A = \gamma \cdot h \cdot \alpha \cdot \int_0^{l_2} \int_0^{d_4} dx dy$$

Um in diesem Fall Hebungen zu produzieren, muss das Produkt aus Suspensionsdruck p_{Bohr} [kN/m²] und horizontaler Fläche \bar{A} (projizierte Fläche), über die sich die Suspension verteilen konnte [m²], größer als das Gewicht des überlagernden Bodenpakets [kN] sein. Effekte aus Einspannungen und Druckgewölben treten hier in den Hintergrund.

3.2 Kritische Randbedingungen und Phänomene

Welche hydraulischen, hydrologischen, rheologischen und geologischen Voraussetzungen die Druckausbreitung/Druckfortpflanzung im Untergrund und damit das Auftreten von Geländehebungen begünstigen, zeigen nachfolgende Punkte:

- Die Druckausbreitung/Druckfortpflanzung innerhalb der Suspension muss möglich sein, d.h. die Viskosität der Suspension muss eine Druckübertragung über eine definierte Strecke hin zulassen. Hierbei ist die zeitabhängige Veränderung der Viskosität zu beachten.
- Ein Verlaufen der Suspension unter dem gegebenen Suspensionsdruck p_{Bohr} muss grundsätzlich möglich sein. Abhängig ist dies von folgenden Einflussgrößen:
 - Viskosität der Suspension
 - Konsistenz der Suspension
 - Klufweite
 - Kluftrauhigkeit

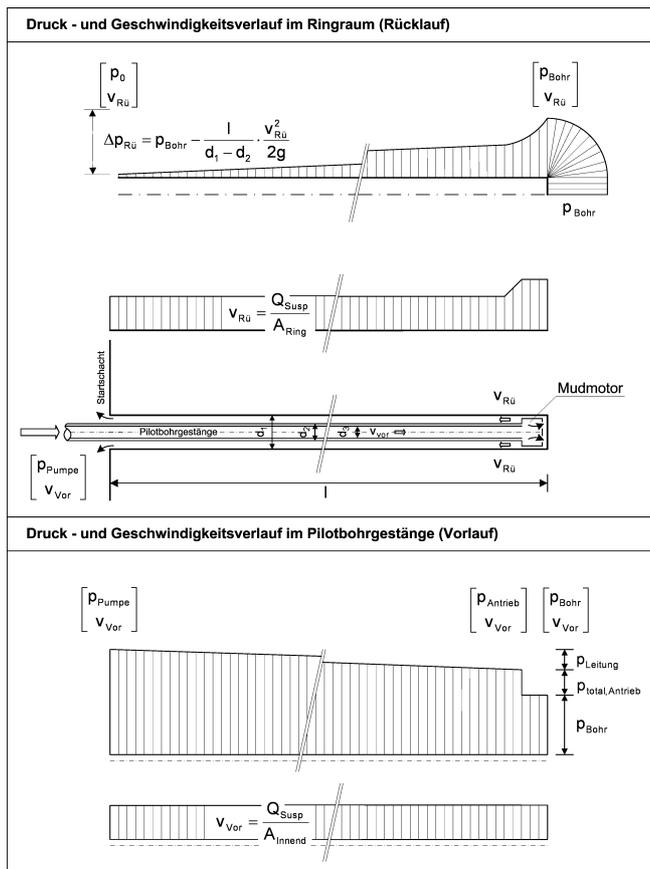


Bild 7. Druckverlauf im Ringraum einer HDD-Bohrung in homogenem, nicht geklüftetem Untergrund
 Fig. 7. Hydraulic drill mud pressure along the bore hole in homogenous unjointed underground

- räumliche Erstreckung der Klufft
- Verhältnis von Klufftweite zu „Korngröße“ der Suspension
- Druck

Der Begriff „Klufft“ wird hier im Sinne der Felsmechanik verstanden, somit schließt er auch andere Trennflächen wie Bankfugen (- horizontal), Klüfte (- vertikal) oder Störungsflächen ein.

- Ein Druckanstieg innerhalb eines mit Suspension gefüllten Klufftsystems kann erfolgen, wenn:
 - die geringe Klufftweite bzw. eine Klufftverengung ein weiteres Ausbreiten der Suspension verhindert oder
 - das Klufftsystem vollständig gefüllt ist, und so infolge der Inkompressibilität der Suspension ein unmittelbarer Druckanstieg erfolgt.
- Hebungen bleiben aus oder treten nur in sehr geringem Masse auf, wenn Entspannungsmöglichkeiten vorhanden sind. Das ist gegeben, wenn:
 - im regulären Bohrbetrieb eine Entspannung über den Ringraum der Bohrung erfolgen kann,
 - ein weiträumiges Verlaufen der Suspension möglich ist, d.h. mit der suspensionsgefüllten Klufft korrespondierende Klüfte vorhanden sind, die entweder im Untergrund weit verzweigt sind, oder aber an der Oberfläche enden. In diesem Fall kann es zu Suspensionsaustritten kommen.

4 Stand der Forschung

Derzeit gibt es mehrere Richtlinien und Empfehlungen, die allgemeine Kenndaten zur Planung und Ausführung von HDD- Bohrungen enthalten [3], [4], [5], [6], [7]. Bezüglich

der einzuhaltenden Mindestüberdeckungen oder Aufweitungen werden hier teilweise empirisch gefundene Größenordnungen genannt, wobei jedoch die Abhängigkeiten von z.B. Bodenkennwerten und örtlichen Randbedingungen nur sehr eingeschränkt beschrieben sind.

Aktuelle Forschungsvorhaben im Bereich des HDD werden überwiegend im englischsprachigen Raum vorgenommen. So wurden hier ([9], [10], [11]) verschiedene Einflussparameter auf Hebungen spezifiziert und im Einzelfall experimentell untersucht (Aufweitungsrate, Bodenüberdeckung, Typ des Reamers und Suspensionsverbrauch). Zur Beschreibung der Abhängigkeiten der untersuchten Parameter und der beobachteten Bodenhebungen wurden aufbauend auf den Experimenten mathematische Modelle zur Vorhersage von Bodenhebungen gefunden. Eine Beschreibung des Einflusses unterschiedlicher Bodenkennwerte erfolgte in diesen Untersuchungen jedoch nicht.

Neben den Bodenhebungen sind Ausbläser (Suspensionsaustritte) als spezifisches Problem bei HDD bekannt, wobei insbesondere der Druck der Bohr- und Stützsuspension sowie unterschiedliche Bodeneigenschaften (u.a. Klüftigkeit, Durchlässigkeit) als entscheidende Einflusskriterien genannt werden müssen ([9], [14], [16]). Das Verhalten des anstehenden Bodens respektive der Bohrlochwandung unter verschiedenen Bohrlochdrücken wurde daher in weiteren Forschungen untersucht ([12], [13], [15]). Neben der Bemessung mit klassischen Handrechenformeln wurden dabei FE-Berechnungen durchgeführt, um den Einfluss des Bohrlochdruckes und das Auftreten von Ausbläsern in Abhängigkeit von den Bodenarten näher zu spezifizieren. Aufgrund der Vielzahl der möglichen Bodenarten und -kenngrößen gelten diese Simulationsberechnungen jedoch stets nur exemplarisch für die jeweils angenommenen, idealisierten Bodenkennwerte.

Die Funktionsweise sowie die verfahrensbedingten Besonderheiten von hydrostatischen Bohrmotoren (Mud-Motoren) sind in einer jüngeren deutschsprachigen Dissertation zum Thema komplexe Bohrgarnituren [8] sowie in einem Praxishandbuch zu HDD [7] erläutert. Erwähnt wird darin zwar der prinzipielle Zusammenhang zwischen Drehmomentbeanspruchung am Bohrkopf und dem Restdruck nach Durchlaufen des Bohrmotors, jedoch finden sich keinerlei Hinweise auf mögliche Auswirkungen im praktischen Anwendungsfall. Insbesondere bei geklüfteten Böden oder Böden mit Schichten unterschiedlicher Festigkeiten ergibt sich daraus die Problematik der stark variierenden Druckverläufe der Spülsuspension im Bohrloch während des Bohrganges. Zu diesen verfahrensbedingten Risiken existieren bis dato keine aussagekräftigen Forschungsergebnisse.

5 Druckverlauf und -ausbreitung bei Pilotbohrungen

5.1 Druckverlauf – Pilotbohrung in homogenem, ungeklüfteten Untergrund

Verläuft die Bohrung in homogenem, nicht geklüftetem Untergrund, so tritt die gesamte Menge an Spül- und Stützsuspension nach Durchlaufen der Bohrkronen bzw. des Mud-Motors als Rücklauf am Bohrmund wieder aus. Der Druckverlauf über den gesamten Bohrstrang ist in Bild 7 dargestellt. Im Bohrloch tiefsten steht der Druck „ p_{Bohr} “ an, das ist jener Suspensionsdruck, der nach Durchlaufen des Bohrstranges und der Bohrkronen bzw. des Mud-Motors (siehe Punkt 2.3) herrscht. Im Ringraum entlang des Bohr-

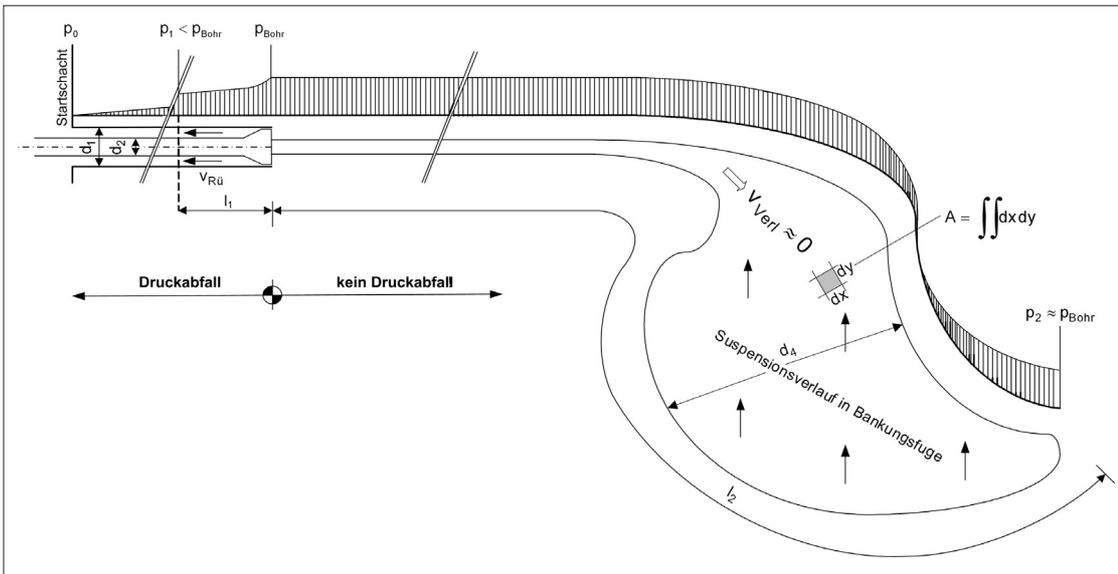


Bild 8. Druckverlauf bei Bohrbetrieb in einem suspensionsgefüllten Kluft- bzw. Bankfugensystem im Endzustand ($v_{\text{Verl}} = 0$)
 Fig. 8. Hydraulic drill mud pressure in jointed rock during drilling operation in the final stage ($v_{\text{Verl}} = 0$)

strangs erfolgt nun, nach Bernoulli, zum Bohrlochmund hin der Druckabbau.

Aufgrund der relativ geringen Druckangriffsfläche – sie entspricht der projizierten Fläche der Bohrung – und der geringen Ausdehnung in Querrichtung zur Bohrachse, ergeben sich hier nur bei sehr geringer Überdeckung oder sehr ungünstigen geotechnischen Parametern Probleme hinsichtlich der schadlosen Aufnahme der anstehenden Suspensionsdrücke. Im Normalfall ergeben sich bei funktionierendem Rücklauf keine Probleme, wenn zusätzlich die Bedingungen von Kapitel 3.1 eingehalten werden.

5.2 Druckverlauf – Pilotbohrung in geklüftetem Untergrund

Werden im Verlauf der Bohrung einzelne Klüfte oder Kluftsysteme angeschnitten, so kommt es zu einem Verlaufen der Suspension in diesen Hohlräumen. Ein Teil der über das Bohrgestänge eingebrachten Spül- und Stützsuspension verläuft nun unkontrolliert in den Kluflhohlräumen und füllt diese so lange, bis diese entweder vollständig gefüllt sind oder die zunehmenden Fließwiderstände ein weiteres Verlaufen unterbinden. Der Druckverlauf entlang des Bohrstranges sowie im mit Suspension gefüllten Kluftsystem (Endzustand) ist in Bild 8 dargestellt. Gezeigt wird hier jene Situation, in der aufgrund sehr geringer Fließgeschwindigkeit oder völligem Stillstand der Suspension im Bereich des Kluftsystems auch kein Druckabbau mehr stattfinden kann (Bernoulli) und somit über die gesamte Druckangriffsfläche der hydrostatische Druck „ p_{Bohr} “ (aktueller Druck am Bohrkopf) zur Wirkung kommt.

Abhängig von der Ausdehnung der Klüfte bzw. Bankungsfugen im Verhältnis zur Überdeckung kommt es in dieser Situation sehr oft zu kritischen Verhältnissen hinsichtlich der Gefahr von Geländehebungen. Der vertikal nach oben gerichteten Kraftkomponente (Bild 6), die aus dem Suspensionsdruck und der großen Druckangriffsfläche resultiert, wirkt hier lediglich die Auflast aus dem Gewicht des die Kluftfläche überlagernden Bodenkörpers entgegen. Stellt man diese beiden Kraftkomponenten einander gegenüber, wird sehr schnell deutlich, wie groß die Gefahr einer Geländehebung bei den im Bohrbetrieb gebräuchlichen Betriebsdrücken ist (Kapitel 3.1).

Infolge eines vollständigen Rücklaufes der Suspension gilt:

$$p_1 = p_{\text{Bohr}} - \frac{1}{d_1 - d_2} \lambda \frac{v_{\text{Rü}}^2}{2g}$$

- l ... Bohrgestängelänge
- d_1 ... Bohrlochdurchmesser
- d_2 ... Bohrstrangdurchmesser

$$v_{\text{Rü}} = \frac{Q_{\text{Rü}}}{A_{\text{Ring}}}$$

Verläuft die Suspension in Klüften, muss man zwei Phasen unterscheiden.

In der ersten Phase verläuft die Suspension, was mit einem leichten bis deutlichen Rückgang der Rücklaufsusension einhergeht. In der Endphase, bei nicht vorhandener Ringraumverstopfung, nimmt der Rücklauf nach vollständiger Füllung der Kluflhohlräume, bzw. wenn enge Klüfte (hohe Fließwiderstände) ein weiteres Ausbreiten der Suspension verhindern, wieder zu. Es ist nun im Kluftsystem der hydrostatische Zustand erreicht ($v_{\text{Verl}} = 0$). Dann kann durch den Restdruck am Bohrkopf „ p_{Bohr} “, bei entsprechend großflächiger Verteilung in einer Bankfuge, eine hydraulische Pressenwirkung in der wirksamen „Kolbenfläche“ auftreten und so eine Geländehebung verursachen oder bei vertikalen Klüften ein oberirdischer Suspensionsaustritt erfolgen.

Für die Bestimmung der Hebung im Endzustand eines großflächigen Suspensionsverlaufs gelten folgende Beziehungen:

Druck in der Hebungsfäche, nach Beendigung der Ausbreitung der Suspension:

$$p_2 \left\{ p_2 \left| p_2 p_{\text{Bohr}} \frac{l_{\text{Verl}}}{d} \lambda \frac{v_{\text{Verl}}^2}{2g} \text{ mit } v_{\text{Verl}} 0^* \Rightarrow p_2 p_{\text{Bohr}} \right. \right\}$$

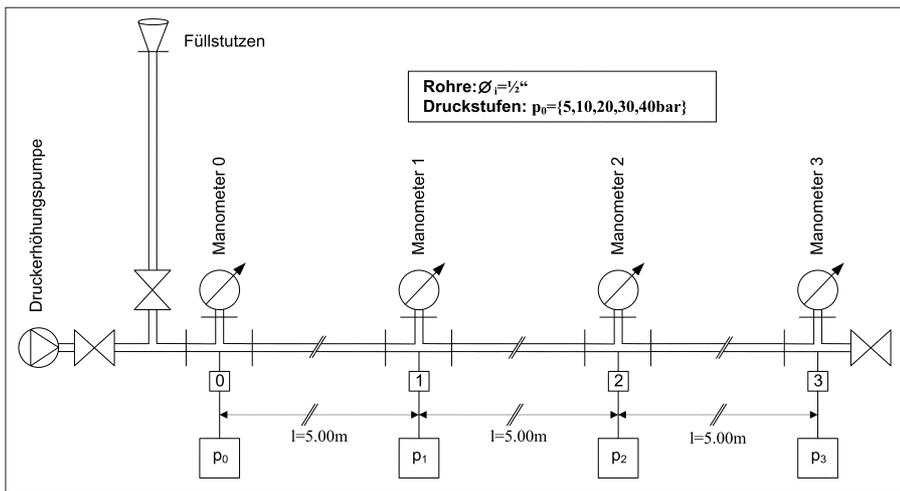


Bild 9. Versuchsaufbau
Fig. 9. Experimental setup

$$\tilde{d} = \frac{2 \cdot \Delta h \cdot d_4}{\Delta h + d_4}$$

$$l_{\text{Verl}} \approx \frac{l_2 + d_4}{2}$$

d_4 ... mittlere Breite der Fläche der verlaufenden Suspension
 Δh ... mittlere Weite (Höhe) der Bankfuge

l_2 ... mittlere Länge der Fläche der verlaufenden Suspension
Voraussetzung:

- Die Kluft Hohlräume sind vollständig gefüllt.
 - Sehr geringe Kluftweiten verhindern das weitere Ausbreiten der Suspension.
- „Kolbenkraft“ in der Hebungsfläche:

$$V_{\text{Susp}} = p_{\text{Bohr}} \cdot \tilde{A}$$

Effektive Hebungsfläche (projizierte Fläche) des „Kolbens“:

$$A = \alpha \cdot \int_0^{l_2} \int_0^{d_4} dx dy$$

α ... Abminderungsfaktor für wirksame Hebelfläche (projizierte Fläche)

d_4 ... Ausdehnung des Druckkissens in x-Richtung

l_2 ... Ausdehnung des Druckkissens in y-Richtung

Volumen der verlaufenden Suspension (ohne Rücklauf!) vor dem Endzustand:

$$V_{\text{Pump}} = \tilde{A} \cdot \Delta h$$

Hebungsbedingung bei großflächiger Suspensionsausbreitung:

$$V_{\text{Susp}} > \tilde{G}$$

Gewicht der Überlagerung:

$$G = \gamma \cdot h \cdot \tilde{A}$$

Daraus folgt der Hebungsdruck bei großflächigem Suspensionsverlauf in einer Bankfuge:

$$p_{\text{Bohr}} > \gamma \cdot h$$

6 Zeitabhängige Druckfortpflanzung in Bentonitsuspension

6.1 Problemstellung

Bei der Interpretation potentieller bzw. bereits eingetretener Schadensereignisse stehen oft folgende Fragen im Mittelpunkt:

- Wie weit ist die Druckausbreitung in Bentonitsuspension innerhalb eines Kluftsystems möglich?
- Wie ist die zeitliche Veränderung dieses Phänomens?

Da über die Druckausbreitung in viskosen Flüssigkeiten in der Literatur kaum verwertbare Aufzeichnungen zu finden sind, wurde zur Beantwortung dieser elementaren Fragen am Institut für Bauplanung und Baubetrieb der ETH Zürich ein Laborversuch durchgeführt.

6.2 Versuchsdurchführung

Vor Beginn der konkreten Planung der Versuchsanlage war die Frage zu klären, ob für die gesamte Bandbreite der möglichen geologischen Verhältnisse Klüfte und Bankfugen im Untergrund durch eine Stahlrohrleitung simuliert werden können. Die Diskussion dieser Frage mit Baugrundgutachtern und Geologen ergab, dass die Ergebnisse dieses Versuches nur für all jene geologischen Bedingungen Gültigkeit haben, bei denen kein Ionenaustausch zwischen Bentonitsuspension und Grundwasser stattfindet [17].

Der Versuchsaufbau (Bild 9) bestand aus einem 15,00 m langen horizontalen Stahlrohr, in das alle 5,00 m mit einem T-Stück ein Manometer eingebaut war. An das Versuchsrohr waren ein Einfüllstutzen und ein Anschluss für die Druckerhöhungspumpe, jeweils mit einem Kegelventil getrennt verschließbar, angeschlossen. Das Befüllen des Versuchsaufbaus mit Bentonitsuspension, ohne einen Rückfluss der Bentonitsuspension in die Pumpe zu verursachen, und eine Druckerhöhung, ohne einen Rückfluss in den Füllstutzen zu verursachen, konnten somit sichergestellt werden. Das Ende des Versuchsrohres war mit einem Kegelventil verschließbar.

Die verwendete Bentonitsuspension wies einen Feststoffanteil von 32,5 kg Bentonit HDG pro m^3 auf. Dieses Mischungsverhältnis entspricht den Empfehlungen des Herstellers (30–35 kg/m^3).

Der Messzyklus sah folgende Druckstufen am Messpunkt 0 (Manometer an der Pumpenseite des 15 m langen Prüfrohres) vor: $p_0 = 5, 10, 20, 30$ und 40 bar. Der jeweilige Prüfdruck wurde über die Dauer von 10 Minuten aufrechterhalten bzw. es wurde überprüft, dass an den einzelnen Messstellen keinerlei Veränderungen des Druckes mehr auftraten. Bei Erreichen jeder Druckstufe am Manometer 0 wurden die Drücke an den Manometern 1–3 aufgezeichnet. Nach Erreichen der höchsten Druckstufe (40 bar) wurde das Versuchsrohr pumpenseitig entspannt.

Der Messzyklus wurde zuerst stündlich über 48 Stunden, dann alle 12 Stunden über 7 Tage durchgeführt.

6.3 Versuchsergebnisse und Interpretation

Ein Druckabfall der Manometer 1–5 im Verhältnis zu Manometer 0 konnte zu keinem Zeitpunkt der Messperiode (9 Tage) festgestellt werden. Damit konnte nachgewiesen werden, dass:

- die Bentonitsuspension trotz ihrer thixotropen Eigenschaften sich auch nach Tagen ohne Fließbewegung wie eine inkompressible Flüssigkeit verhält und damit bei Druckbeaufschlagung den Druck unmittelbar isotrop weiterleitet,
- die zeitliche Veränderung der Konsistenz der Bentonitsuspension, im betrachteten Messintervall, keinen erkennbaren Einfluss auf die Druckausbreitung hat,
- die Druckausbreitung in der Bentonitsuspension über größere Entfernungen (Länge der Versuchseinrichtung 15 m) auch bei längeren Standzeiten ungehindert möglich ist.

7 Konsequenzen für den Bohrbetrieb

Verläuft die Bohrung in homogenem, nicht geklüftetem Untergrund und ist demzufolge kein Suspensionsverlust festzustellen (durch kontinuierlichen, gleichmäßigen Rücklauf), werden aufgrund der günstigen geometrischen Randbedingungen (Verhältnis von Überdeckung zu Druckangriffsfläche – hier näherungsweise: $A = d^2$) die relativ hohen Suspensionsdrücke ($p_{\text{Bohr}} \leq 35 \text{ bar}$) schadlos aufgenommen, d. h. es treten keine messbaren Hebungserscheinungen an der Oberfläche auf.

Verläuft beim Durchhörtern geklüfteter bzw. gebankter Formationen die Suspension unkontrolliert im Untergrund, so ergibt sich nach der in Punkt 5.2 aufgezeigten prinzipiellen Zusammenhänge, dass in dem Zeitraum des Suspensionsverlaufs das Risiko einer Geländehebung grundsätzlich von der Möglichkeit des Druckabbaus im Bereich des suspensionsgefüllten Bankfugensystems abhängt. Nachfolgend werden zwei grundsätzliche Fälle unterschieden.

a) Verlaufen geringerer Suspensionsmengen:

Beim Verlaufen geringer Suspensionsmengen ist die Hebungsfahr vergleichbar mit der Situation in nicht geklüftetem Untergrund. Das Hebungsphänomen lässt sich mit der Silotheorie eingrenzen (Bild 5). Mit diesem Ansatz lässt sich die Druckbegrenzung in Abhängigkeit zur Überlagerungshöhe, unter Berücksichtigung eines entsprechenden Sicherheitsfaktors, projektspezifisch bestimmen. Für die Praxis ergibt sich das Problem, dass geringe Suspensionsverluste mit den heute gebräuchlichen Methoden zur Mengemessung des Rücklaufs kaum erfasst werden können. Es ist nicht eindeutig feststellbar, ob geringe Fehlmengen dem Aufbau des für die Stützung der Bohrlochwandung erforderlichen Filterkuchens zuzuordnen sind, oder ob es sich dabei um echte Suspensionsverläufe in Kluft- oder Bankfugensysteme handelt. Zu beachten ist jedoch, dass auch geringe Suspensionsverläufe pro Zeiteinheit, unbemerkt über eine längere Zeitspanne, großflächige Bankfugen- und Kluftsysteme füllen können, womit der nachfolgend unter b) beschriebene Mechanismus wirksam wird.

b) Verlaufen größerer Suspensionsmengen:

Kommt es bei Bohrungen zu größeren Suspensionsverläufen, die im praktischen Bohrbetrieb zweifelsfrei registriert werden können, so treten im Endzustand die in Bild 8 dargestellten Phänomene auf.

Der Hebungszustand ist ein dynamischer Prozess, bei dem bei abnehmendem oder ausbleibendem Rücklauf die Sus-

pension in Phase 1 zuerst im Bankfugensystem verläuft, ohne dass merkbare Hebungsphänomene auftreten. Der Druckabbau innerhalb des Kluftsystems erfolgt aufgrund der vorhandenen Fließgeschwindigkeit. Das Risiko einer Geländehebung nimmt mit abnehmender Fließgeschwindigkeit im Bankfugensystem zu. Klingt das Verlaufen der Suspension ab, beginnt die kritische Phase 2.

Im Untergrund stellt sich die Situation in Phase 2 wie folgt dar: Ein weiteres Ausbreiten der Suspension wird entweder aufgrund vollständiger Füllung des Bankfugensystems, oder durch zunehmende Erhöhung der Fließwiderstände (geringe Kluftweiten, Kluftrauigkeit, Viskosität der Suspension etc.) unterbunden. Wird nun der Bohrbetrieb fortgeführt, kommt es zu einer Druckbeaufschlagung dieses mit einer inkompressiblen Flüssigkeit gefüllten Bankfugensystems. Die unbehinderte Druckfortpflanzung in diesem System, auch über längere Distanzen und auch noch nach längeren Zeitintervallen (siehe Punkt 6.3), bedeutet für den praktischen Bohrbetrieb, dass jegliche weiteren Bohrversuche, auch nach längeren Unterbrechungen, mit den heute zur Verfügung stehenden Bohrausrüstungen und Sicherheitskonzepten mit einem beträchtlichen, schwer abwägbaren Risiko einer Geländehebung verbunden sind.

8 Folgerungen für die geotechnische Vorerkundung

8.1 Häufige und bekannte Erschwernisse beim Bohren

Für Horizontalbohrungen bilden grobkörnige Kies-, Stein- und Blocklagen, Aufschüttungen unbekannter und wechselhafter Zusammensetzung sowie eine in der Bohrtrasse liegende und in ihrer Höhenlage variierende Felsoberkante häufige und allgemein bekannte Erschwernisse. Gemeinsam ist solchen Untergrundverhältnissen, dass die Schichten in den meisten Fällen stark bis sehr stark durchlässig sind. Daher kann sich die eventuell austretende Suspension in den Hohlräumen bzw. im Porenraum, ohne in Bezug auf Hebungen kritischen Druckanstieg verteilen. Ein unzulässiger Überdruck der Bohrspülung tritt dabei im Untergrund im Allgemeinen nicht auf. Daher betreffen solche Erschwernisse ausschließlich den Bohrbetrieb und führen meist zu hohem Bohrstahlverschleiß. Dies führt aber nicht zu Einwirkungen im Umfeld.

Auch der Fall einer kleinen Druckangriffsfläche im Vergleich zur Überlagerungshöhe gemäß Kap. 5.1 und Bild 5 ist in der Regel beherrschbar. Die Wichte der Überlagerung und die Scherfestigkeit der betreffenden Boden- und Felschichten sind üblicherweise hinreichend bekannt oder können zuverlässig abgeschätzt werden.

Wesentlich kritischer ist der Fall von Geländehebungen infolge großflächigen Suspensionsverlaufs in Kluft- oder Bankfugensystemen (Bild 6 und Bild 8) zu sehen, wie im Folgenden dargestellt wird.

8.2 Schadensfälle in neuerer Zeit durch großflächigen Suspensionsverlauf – Geologische Randbedingungen

Das Risiko eines großflächigen Suspensionsverlaufes ist gegeben, wenn Wechselfolgen aus Gesteinen sehr unterschiedlicher Durchlässigkeit anstehen, wie:

- Schichten mit hohem Porenvolumen, großen Öffnungsweiten von Bankfugen oder Klüfte bzw. Schwächezonen, die durch den anstehenden Suspensionsdruck aufgesprengt werden können, ermöglichen das flächige Ausbreiten der Suspension und

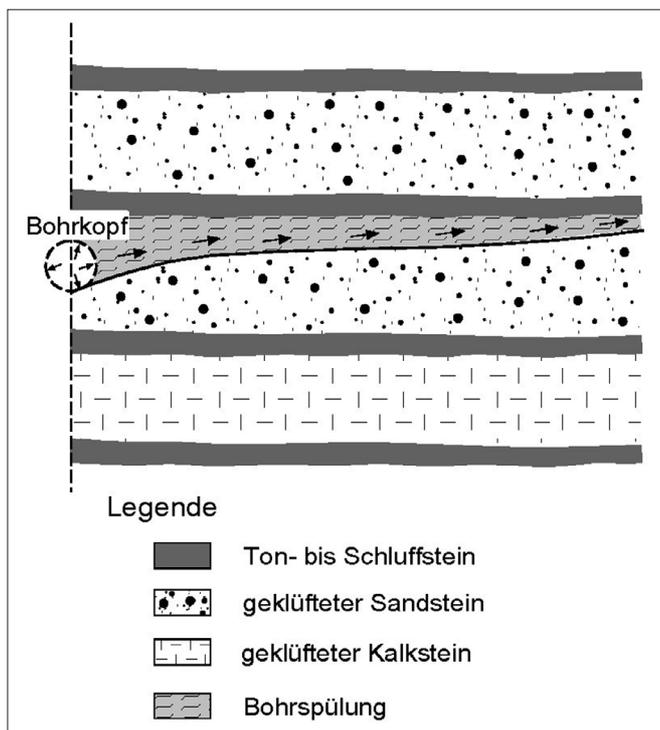


Bild 10. Risiko des Aufweitens von Fugen bei Wechselfolgen von durchlässigen und gering durchlässigen Schichten

Fig. 10. Risk of hydraulic fracturing in alternating formations of permeable and impermeable soil or rock

– darüber liegende Schichten sehr geringer Durchlässigkeit, wirksam als Grundwasserhemmer oder Nichtleiter (Bild 10).

Solche Schichtenfolgen finden sich häufig in Fels mäßiger bis geringer Festigkeit, der aus einer Wechselfolge von Sandsteinen oder Kalksteinen mit Schluff- bis Tonsteinlagen besteht. Ein anderes Beispiel sind Wechselfolgen von Basalt und Tufflagen.

In solchen Wechselfolgen haben die Klüfte Öffnungsweiten von Millimetern bis zu über 1 cm. Bankfugen oder horizontale Fugen haben primär nur geringe Öffnungsweiten. Wegen der nahezu fehlenden Zugfestigkeit werden horizontale Fugen in Tiefen bis etwa 15 m aber in HDD-Bohrungen schon durch niedrige Suspensionsdrücke „ p_{Bohr} “ aufgeweitet (hydraulic fracturing) und damit wasserwegsam. Die Gebirgsauflast beträgt in 15 m Tiefe nur etwa 400 kN/m² (15 m x 27 kN/m³ = 405 kN/m²) [17].

Derartige Schichtenfolgen kommen in nahezu allen Teilen der Welt vor. Beispiele sind das Pariser Becken in Frankreich, das Triasbecken in Süddeutschland, bestimmte Molassefolgen in der Schweiz, Österreich und Bayern sowie mesozoische und tertiäre Wechselfolgen im Süden der USA und in Mittelamerika.

In all diesen Fällen kann sich die Bohrsuspension nach dem Austritt aus dem Bohrkopf innerhalb der durchlässigen Schichten ohne großen Druckverlust ausbreiten. Da abdichtende Ton- oder Tuffschichten eine Druckentlastung nach oben verhindern, kann auf relativ großen Flächen der Suspensionsdruck „ p_{Bohr} “ wirksam werden, der deutlich über der Gebirgsauflast liegt. Geländehebungen sind dann unvermeidlich [18].

Nach jüngeren Erfahrungen aus dem städtischen Rohrleitungsbau mit HDD-Bohrungen sowie den schon länger bekannten Beobachtungen aus der Injektionstechnik kön-

nen Geländehebungen bis in Entfernungen zur Bohrtrasse von einigen zehn Meter reichen. Dabei können Flächen von über 1.000 m² angehoben werden.

8.3 Ingenieurgeologische Vorerkundung und begleitende Messungen im Feld

Das Risiko von Geländehebungen bei HDD-Bohrungen kann im Rahmen der Vorerkundung durch eine Bestimmung der Durchlässigkeits- und Grundwasserverhältnisse erkundet und beurteilt werden. Hilfreich sind Wasserabpressungen mit mehreren auf- und absteigenden Druckstufen in den maßgeblichen Schichten, gegebenenfalls ergänzt durch Piezometerzellen oder Grundwassermessstellen, um den räumlichen Druckaufbau im Untergrund zu erfassen. In kritischen Fällen kann es bei erhöhtem Schadenspotential auch zweckmäßig sein, Feldversuche mit der endgültigen Suspension durchzuführen, um deren Ausbreitungsverhalten und den Druckverlauf in situ zu bestimmen.

Vor Durchführung der Pilotbohrung sollten eine Beweissicherung durchgeführt und ein Mess- und Kontrollsystem installiert werden, um kritische Verformungszustände bzw. Gelände- oder Bauwerkshebungen schon im Ansatz zu erkennen. Für die Planung und Einrichtung eines entsprechenden Messnetzes sind Kenntnisse über das Fließverhalten der Suspension und den zu erwartenden Druckverlauf bei Suspensionsaustritten aus dem Bohrkopf erforderlich. Grenzwerte für zulässige Verformungen an Bauwerken und im Gelände sind im Voraus festzulegen. Aus dem Ablauf eines potentiellen Schadensfalles, der verfügbaren bzw. notwendigen Eingreifzeit in den Bohrbetrieb sowie den Entscheidungspfaden und deren Zeitbedarf ergeben sich weitere Randbedingungen für die Planung des Mess- und Kontrollsystems und des Störfallszenarios. Hierzu gehören auch die Festlegung der Mess-Intervalle, die laufende Auswertung und Interpretation der Daten, ein permanenter Soll-Ist-Vergleich zwischen Vorhersage und Realität sowie die gegebenenfalls zu treffenden Maßnahmen.

9 Fazit

Die hier aufgezeigte Problematik von druckbedingten Geländehebungen in Bereichen von Bankfugen oder horizontalen, flächigen Schwächezonen im Bereich des HDD-Bohrungshorizonts zeigt die Bedeutung einer fachkundigen geologischen Beurteilung des Baugrundes. Treten im Zuge der geologischen Baugrunderkundung Hinweise auf Bankfugen oder Klüfte auf, ist ein detailliertes, darauf abgestimmtes Erkundungsprogramm durchzuführen, dessen Daten ausreichen, ein exaktes Baugrundmodell zu erstellen. Dieses Baugrundmodell stellt die Basis für die weitere Interpretation durch ein Spezialistenteam, bestehend aus Geologen bzw. Ingenieurgeologen, Geotechnikern und Bauverfahrensspezialisten dar.

Die Analyse der Zusammenhänge im Falle von Suspensionsverläufen in Kluft- und Bankfugensystemen zeigt deutlich die möglichen systembedingten Gefahren sowie die Grenzen des Erkennens, der Interpretation und der Beherrschung derartiger Zwischenfälle im Bohrbetrieb. Bei HDD-Bohrungen im Bereich von Kluft- oder Bankfugensystemen sowie von Schichten mit stark wechselnden Festigkeiten resultieren verfahrensbedingt eine Vielzahl von Schäden, deren fallübergreifende Aufarbeitung einschließlich der daraus abzuleitenden verfahrenstech-

nischen Anwendung weiterer Forschungsanstrengungen bedarf. HDD-Bohrungen sind immer noch ein relativ neues Bohrverfahren, über dessen Risiken und deren Häufigkeit wenige Erfahrungen vorliegen (siehe auch EN 1997-1 und DIN 4020).

Nur durch weitere Untersuchungen kann spezifiziert werden, wie in solchen Bankfugen- und Kluftsystemen eine sichere Anwendung des HDD-Verfahrens grundsätzlich oder mit einer entsprechenden verfahrenstechnischen Anpassung möglich ist.

Literatur

- [1] *Girmscheid, G.*: Bauverfahren des Spezialtiefbaus, Vorlesungsskript, Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH Zürich, 2005
- [2] *Girmscheid, G.*: Neue horizontale Injektionsmethoden, Bautechnik, Band 73, 1996
- [3] NASTT: Horizontal Directional Drilling Good Practice Guidelines, 2004
- [4] GSTT: Anforderungen an Planung, Ausschreibung und Vorbereitung der Bauarbeiten von grabenlosen Unterquerungen nach dem gesteuerten Horizontalbohrverfahren. GSTT Informationen Nr. 5, 02/2003
- [5] DVGW-Arbeitsblatt GW 321 (10/03): Steuerbare horizontale Spülbohrverfahren für Gas- und Wasserrohrleitungen
- [6] Technische Richtlinien des DCA, Informationen und Empfehlungen für Planung, Bau und Dokumentation von HDD-Projekten, 2. Auflage, 2000
- [7] *Bayer, H.-J.*: HDD Practice Handbook, Vulkan-Verlag, 2005
- [8] *Reich, M.*: Untersuchung komplexer Bohrgarnituren mit integriertem, schaltbarem Erweiterungswerkzeug. Dissertation an der TU Bergakademie Freiberg, 2003
- [9] *Lueke, J.; Ariaratnam, S.*: Experimental procedures for evaluating ground displacements factors in directional drilling. In Canadian Journal of civil engineering, Volume 30, Number 5, 1 October 2003
- [10] *Lueke, J.; Ariaratnam, S.*: Surface heave mechanisms in horizontal directional drilling. In: Journal of construction engineering and management, 05/2005
- [11] *Lueke, J.; Ariaratnam, S.*: Numerical characterisation of surface heave associated with horizontal directional drilling. In: Tunnelling and Underground Space Technology, 21/2006
- [12] *Kennedy, M. J., Skinner, G. D., Moore, I. D.*: Elastic Calculations of Limiting Mud Pressures to Control Hydrofracturing During HDD. In NASTT: Proceedings of No-Dig 2004 Conference, New Orleans, Louisiana, 2004
- [13] *Francis, M.; Kwong, J.; Kawamura, K.*: Analysis of heave and subsidence risk for horizontal directional drilling. In: Proceedings of the ASCE International Conference on Pipeline Engineering and Construction, Baltimore, Maryland, July 13–16, 2003
- [14] *Gelinas, M; Mathy, D.*: Designing and Interpreting geotechnical Investigations for horizontal directional drilling. In: Pipelines 2004 International Conference, San Diego, California, 2004
- [15] *Wang, J; Sterling, R.*: Stability analysis of a borehole wall in horizontal directional drilling. In: NASTT: Proceedings of No-Dig 2004 Conference, New Orleans, Louisiana, 2004
- [16] *Ariaratnam, S.; Stauber, R.; Bell, J.; Harbin, B.; Canon, F.*: Predicting and controlling hydraulic fracturing during horizontal directional drilling. In: Proceedings of the ASCE International Conference on Pipeline Engineering and Construction, Baltimore, Maryland, July 13–16, 2003
- [17] *Heitfeld, M., Mohrdieck, P., Schetelig, K.*: Eignung verschiedener Durchlässigkeitsversuche. In: Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Bd. 4, Geotechnik, Hydrogeologie, S. 495–508, 2 Tab., Springer Verlag, Berlin, 1998
- [18] *Ewert, F. K.*: Rock Grouting with emphasis on Dam Sites. Springer Verlag, Berlin, 1985