

Diploma Thesis

**Directional and directed drilling
Technology overview
and process analyses**

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

**Gesteuertes und gerichtetes Bohren
Technologieüberblick und Verfahrensanalyse**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

David Oppitz, BSc

Matr.Nr.: 1125730

unter der Anleitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Dietmar Adam**

Proj.Ass. Dipl.-Ing. **Péter Nagy, BSc**

Institut für Geotechnik
Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/220/2, 1040 Wien, Österreich

Wien, im April 2018

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich in der Zeit meines Studiums und während der Erstellung dieser Arbeit, sowohl fachlich als auch persönlich unterstützt haben.

Ganz besonderer Dank gilt Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam sowie der Firma Züblin Spezialtiefbau, die es mir ermöglicht haben, meine Diplomarbeit zu diesem Thema zu verfassen.

Des weiteren möchte ich mich bei meinem Betreuer, Herrn Proj. Ass. Dipl.-Ing. Péter Nagy BSc herzlich für seine Unterstützung bedanken.

Großer Dank gebührt Herrn Dipl.-Ing. Paul Rohm BSc, der mich über den gesamten Arbeitsprozess von der Firmenseite begleitet hat. Vielen Dank für die vielen konstruktiven Gespräche sowie Anregungen.

Danke auch an meine Familie, die mir dieses Studium ermöglicht und mich bei all meinen Entscheidungen bestärkt hat.

Abschließend gilt mein besonderer Dank meiner langjährigen Freundin und Begleiterin Theresa, die mich in schwierigen Phasen des Studiums immer wieder ermutigt hat.

Kurzfassung

Durch den Einsatz von gerichteten sowie von gesteuerten Bohrungen ist es möglich, die erzielbaren Reichweiten von Bohrungen bei gleichbleibender Genauigkeit um ein Vielfaches zu erhöhen. Oftmals wird jedoch der Umstand vernachlässigt, dass der sinnvolle sowie effektive Einsatz dieser Verfahren an gewisse geologische sowie verfahrensbedingte Randbedingungen geknüpft ist. Die wichtigste Randbedingung für den Einsatz derartiger Verfahren ist die vorherrschende Geologie. Für die Anwendung der meisten gesteuerten Bohrverfahren ist eine stabile Bohrlochwand unerlässlich.

Zum Erlangen eines besseren Verständnisses für die unterschiedlichen zum Einsatz kommenden Verfahren beginnt diese Arbeit mit einer umfangreichen Literaturrecherche. Diese Recherche beinhaltet nicht nur die verschiedenen Bohrverfahren sowie deren Wirkprinzipien sondern auch die Spülungstechnologie, vor allem die Anwendbarkeit der unterschiedlichen Spülungen wird behandelt. Des Weiteren werden die Einflüsse auf die Bohrgeschwindigkeit sowie die geologischen, als auch die verfahrensbedingten Ursachen, aufgrund derer Bohrungen von ihrem geplanten Verlauf abweichen können, behandelt. Im Anschluss daran werden die Begriffe des Richtens sowie des Steuerns von Bohrungen klar voneinander abgegrenzt und die im Moment zur Verfügung stehenden Verfahren beschrieben.

Abschließend werden Bohrdaten eines Bauvorhabens hinsichtlich ihrer Aussagekraft auf die geologischen Eigenschaften des Gebirges analysiert. Hierfür werden die Bohr- und Vermessungsdaten von 18 Bohrungen, die sich in sechs Abschnitten, zu je drei Bohrungen befinden, untersucht und ausgewertet. Die Vermessungsdaten beinhalten zudem die Daten der Kamerabefahrung, die an je einer Bohrung des jeweiligen Abschnitts durchgeführt wurde. Durch die kombinierte Analyse der Bohr- und Vermessungsdaten ist es möglich die Bohrdaten jenen Bereichen zuzuordnen, in denen erfolgreiche Steuermanöver ausgeführt wurden. Anhand der Daten aus den Kamerabefahrungen werden für jeden Abschnitt drei Gebirgsbereiche definiert, denen die gefilterten Bohrdaten zugeordnet werden. Daraus lassen sich Aussagen hinsichtlich des Steuerverhaltens in den unterschiedlichen Bereichen treffen. Anhand dieser Aussagen ist ersichtlich, dass es zwei Möglichkeiten dafür gibt, dass die Steigung von Bohrungen zunimmt. Die Erste ist die beabsichtigte Steuerung der Bohrung nach oben. Dies ist in Bereichen mit geringem Bohrfortschritt und einem hohen Spülungsdruck möglich. Die zweite mögliche Ursache für eine Ablenkung der Bohrung ist die Ausbildung von Keilen unter der Verrohrung. Diese Art der Ablenkung von Bohrungen kann jedoch nicht beeinflusst werden. Des Weiteren wird erkannt, dass ein hoher Bohrfortschritt gepaart mit einem niedrigen Spülungsdruck ein Anzeichen für sehr weiche Formationen ist. In derartigen Abschnitten kommt es zu Aufweitungen des Bohrlochs und zu Mehrausbrüchen.

Abstract

By using directed and directional drilling methods, the length of boreholes can be increased without losing accuracy. For the efficiency of these drilling technologies, process related aspects and geological conditions must be considered carefully. The stability of borehole walls is essential for most directional drilling methods.

This thesis contains an extensive literature research, to gain a better understanding of different drilling techniques. This research includes not only a detailed description of the various drilling methods and their basic principles but also the description of flushing technologies. Furthermore, various influence factors on the drilling speed, the geological as well as the process- related aspects that may cause boreholes to deviate from their intended course, are shown. After that, the terms directed as well as directional drilling are defined and the procedures currently available are described.

In the third part of the thesis, drilling data from a construction project are analysed. Therefore, drilling and surveying data from 18 boreholes, located in six different areas are evaluated. The survey data includes recordings from camera surveys, which were carried out in each of this six areas.

Data analysis starts with a separation of sections with successful control manoeuvres. Drilling and surveying data are used combined during this process. Three zones are defined, based on the quality of the borehole wall using the camera survey data. Subsequently, the previously filtered drilling data is assigned to these defined zones.

Finally, an evaluation is performed that contains those areas, in which the drillings could be controlled with the most significant success. This evaluation showed that there are two different ways possible to control drillings. The first option is the intentional up-hole control, which seems to be possible in areas of low drilling progress and high mud pressure. Whereas, the second option is to form wedges under the casing as a result of material collapsing into the borehole. However, this behaviour cannot be influenced directly by the operator. It has also been recognised that high drilling rates in combination with low mud pressure indicating very soft formations. In this formations is the widening of the borehole due to multiple outbreaks possible.

Inhaltsverzeichnis

I	Allgemeine Bohrtechnik	15
1	Geschichte der Bohrtechnik	17
1.1	Altertum	17
1.2	Neuzeit	17
1.2.1	17. Jahrhundert	17
1.2.2	18. Jahrhundert	17
1.2.3	19. Jahrhundert	18
1.2.4	20. Jahrhundert	19
1.2.5	21. Jahrhundert	20
2	Grundlagen der Bohrtechnik	23
2.1	Bohrverfahren	23
2.1.1	Drehende Bohrverfahren	23
2.1.2	Dreh-schlagendes und schlag-drehendes Bohren	38
2.1.3	Schlagendes Bohren	43
2.2	Bohrlochspülung	44
2.2.1	Aufgaben der Bohrspülung	45
2.2.2	Aufbau von Bohrspülungen	47
2.2.3	Spülsaufbereitung	50
2.3	Bohrgeschwindigkeit	54
2.3.1	Maschinen- und Personaltechnische Faktoren	55
2.3.2	Formationseigenschaften	55
2.3.3	Mechanische Faktoren	59
2.3.4	Hydraulische Faktoren	59
2.3.5	Bohrfluideigenschaften	60
2.4	Bohrabweichung	60
2.4.1	Geologische Einflüsse	60
2.4.2	Verfahrensbedingte Abweichung	64
3	Bohrlochvermessung	69
3.1	Vermessungssprinzipien	69
3.1.1	Neigungssensoren	69
3.1.2	Magnetismus	70
3.1.3	Gyroskope (Kreiselsysteme)	70
3.1.4	Optische Systeme	71
3.2	Bohrlochvermessungssysteme	72
3.2.1	Theodolit	72
3.2.2	Ketteninklinometer	73
3.2.3	Walk-Over	73
3.2.4	Electronic Multishot System (EMS)	73
3.2.5	Wire-line-Verfahren	74
3.2.6	Ortung mit künstlichen Magnetfeldern	74

3.2.7	Drill-Pilot®	74
II	Gerichtetes und gesteuertes Bohren	75
1	Gerichtetes Bohren	77
1.1	Drehende Bohrverfahren	78
1.1.1	Rotationskernbohrung	78
1.1.2	Schneckenbohrung	79
1.1.3	Rotarybohrung	79
1.2	Dreh-schlagendes Bohren	80
1.2.1	Außenhammerbohrung	80
1.2.2	Imlochhammerbohrung	80
1.2.3	Vergleich Imlochhammer mit Luft und Imlochhammer mit Wasser	80
2	Gesteuertes Bohren	83
2.1	Gesteuerte Kernbohrung	83
2.2	Gesteuerte Imlochhammerbohrung	86
2.2.1	Gesteuerte Imlochhammerbohrung mit Bentsub	86
2.2.2	Gesteuerte Imlochhammerbohrung mit Ablenkleisten	87
2.3	Gesteuerte Bohrungen mit Rollenmeißel	88
2.3.1	UNI Drill System von DMT	88
2.3.2	Tracto Technik	89
2.3.3	Drilljet	89
2.4	Mudmotorbohrungen	89
2.4.1	Konstruktiver Aufbau von Bohrlochmotoren	90
2.4.2	Funktionsweise	92
2.5	Rotary Seerable System (RSS)	94
2.6	Gesteuerte Spülbohrungen	95
2.6.1	Spüllanzen	96
2.6.2	Jetting	97
III	Analyse und Interpretation von Bohrdaten	99
1	Auswertung und Interpretation von aufgezeichneten Bohrdaten	101
1.1	Bohrdatenerfassung (B.D.E.)	102
1.2	Vermessungsdaten	103
1.3	Geophysikalische Vermessungsdaten	106
1.4	Auswertung der Messergebnisse	106
1.4.1	Abschnitt 1	106
1.4.2	Abschnitt 2	112
1.4.3	Abschnitt 3	114
1.4.4	Abschnitt 4	114
1.4.5	Abschnitt 5	116
1.4.6	Abschnitt 6	118
1.4.7	Resümee	119
1.4.8	Anwendung der Ergebnisse aus der Analyse	121
2	Ausblick	123

Begriffsdefinitionen

Sacklochbohrung: Sacklochbohrungen sind horizontale oder geneigte Bohrungen, bei denen der Bohrkopf, nicht wie es bei HDD-Bohrungen (**H**orizontal **D**irectional **D**rilling) üblich ist, in einer Zielgrube austritt.

Bohrlochmund: Als Bohrlochmund ist der Bohransatzpunkt und somit der Punkt zu verstehen, an dem die Bohrung in den Untergrund eindringt.

Ortsbrust: Als Ortsbrust ist in der vorliegenden Arbeit nicht die Ortsbrust eines Tunnels, sondern die Fläche einer Bohrung zu verstehen, an der der Abbauvorgang stattfindet.

Bohrlochtiefstes: Der Begriff Bohrlochtiefstes wird in der vorliegenden Arbeit sowohl für den tiefsten Punkt bei Vertikalbohrungen, als auch für den am weitesten vom Bohrlochmund entfernten Punkt bei horizontalen Bohrungen verwendet.

Bohrlochsohle: Der Begriff Bohrlochsohle wird analog zum Begriff Bohrlochtiefstes, für den tiefsten Punkt von Vertikalbohrungen sowie den am weitesten vom Bohrlochmund entfernten Punkt der Bohrung bei Horizontalbohrungen verwendet.

Einleitung

Unter einer gesteuerten sowie einer gerichteten Bohrung versteht man die Methodik, eine Bohrung räumlich so im Gebirge abzuteufen, dass sie sich mit dem in der Planung festgelegten Bohrlochverlauf möglichst genau deckt und das definierte Ziel erreicht. Bei der gesteuerten Bohrung wird dies durch aktive und passive Maßnahmen erzielt. Das bedeutet, dass der Verlauf der Bohrung aktiv, während der Bohrung korrigiert beziehungsweise beeinflusst werden kann. Hierfür sind spezielle Bohrwerkzeuge, wie beispielsweise exzentrische Bohrkronen oder ein Kniestück notwendig, welches im Bohrstrang hinter der Bohrkrone angeordnet ist. Durch derartige Einbauten im Bohrstrang ist es möglich, die Bohrung von ihrem Verlauf abzulenken. Im Gegensatz dazu, wird im Falle einer gerichteten Bohrung der Bohransatzpunkt so eingemessen und der Bohrstrang ausgerichtet, dass ohne weitere Maßnahmen der gewünschte Verlauf der Bohrung erreicht werden kann. Das bedeutet, dass während des Bohrvorgangs keine aktive Richtungsänderung mehr möglich ist. Eines der wichtigsten Hilfsmittel bei gerichteten sowie gesteuerten Bohrungen ist das Vermessungssystem. Um über den tatsächlichen Verlauf einer Bohrung zu jedem Zeitpunkt Bescheid zu wissen, ist es notwendig, den Verlauf laufend zu überwachen. In vielen Fällen ist das Vermessungsgerät direkt im Bohrstrang angeordnet und sendet kontinuierlich oder diskontinuierlich Informationen über die aktuelle Position der Bohrung.

Problemstellung

In der Literatur ist heutzutage keine klare Trennung der Begriffe des gesteuerten und des gerichteten Bohrens zu finden. Der Begriff gerichtete Bohrungen wird allgemein verwendet. Aus diesem Umstand resultieren oft Unklarheiten für die ausführenden Firmen, welches Verfahren anzuwenden ist. Gerichtete bzw. gesteuerte Bohrungen entsprechen dem aktuellen Stand der Technik. Hierbei handelt es sich um Verfahren, die in der Erdöltechnik seit Jahrzehnten erfolgreich im Einsatz sind und durch diverse Adaptierungen, wie etwa hochflexible Bohrgestänge, Mitte der 90er Jahre an die Bedürfnisse des Spezialtiefbaus angepasst wurden. Der Einsatz dieser Verfahren bringt sowohl baubetriebliche, wie auch sicherheitstechnische Vorteile mit sich. Es ist möglich die Bauzeit zu reduzieren und damit die Wirtschaftlichkeit zu steigern. Aus diesem Grund werden derartige Bohrungen bei vielen Bauprojekten, vorwiegend bei Tunnelprojekten, eingesetzt. Bei diesen Bohrungen zeichnet der Bohrdatenschreiber verschiedene Verfahrensparameter, wie etwa den Anpressdruck, den Bohrfortschritt oder das Drehmoment auf. Diese Daten werden heutzutage nicht ausreichend zu Interpretationszwecken genutzt. Um die bestehenden Bohrverfahren technisch noch weiter optimieren und ihr volles Potential ausschöpfen zu können, ist es von großer Bedeutung die Daten zu analysieren und zu interpretieren. Der Erfolg einer gesteuerten - wie auch jener einer gerichteten - Bohrung ist von vielen Faktoren und Randbedingungen abhängig, beispielsweise ob es sich um eine horizontale oder vertikale Bohrung handelt. Nicht nur die maßgenaue Einrichtung des Bohrgerätes, sondern auch die verwendete Messeinrichtung und sich durch diese ergebende Messungenauigkeiten haben einen maßgeblichen Einfluss. Den größten Einfluss auf die Genauigkeit haben jedoch die Gebirgseigenschaften im Bereich des Bohrlochverlaufes. Oft stehen einer erfolgreichen Richtungskorrektur lokale Störzonen oder sonstige lokale Inhomogenitäten des Gebirges im Weg. Für erfolgreiche Richtungskorrekturen bei Bohrungen ist eine stabile Bohrlochwand unerlässlich. Da auf Grund punktueller

Baugrundaufschlüsse durch Bohrungen nur sehr grobe Angaben über den lokalen Zustand der Geologie in den Tiefenstufen möglich sind, ist man trotz der fehlenden Randbedingungen oft dazu gezwungen, Richtungskorrekturen vorzunehmen, ohne die Sicherheit zu haben, dass diese erfolgreich ausgeführt werden können. Dies führt in vielen Fällen zu einer Verschlechterung der Situation. Kaliberaufweitungen, Bohrlochverstürze oder das Auswaschen des Gebirges sind nur Beispiele für derartige Verschlechterungen, durch welche es nicht nur zu großen Zeiteinbußen, sondern auch zu negativen Einflüssen auf die Steuerbarkeit kommt.

Zielsetzung

Der erste Teil dieser Arbeit setzt es sich zum Ziel, einen historischen Überblick über die Entwicklung der Bohrtechnik – im Speziellen der Technik des gerichteten sowie des gesteuerten Bohrens – zu geben. Darüber hinaus sollen die Begriffe des „Richtens“ und des „Steuerns“ voneinander klar abgegrenzt werden. Hierzu werden die sich derzeit am Markt befindenden Verfahren beschrieben und einander gegenübergestellt sowie der jeweiligen Methode zugeordnet. Dieser Vergleich soll sowohl technische, als auch wirtschaftliche Gesichtspunkte enthalten und das Ziel verfolgen, eine tabellarische Auswahlhilfe zu entwickeln. Diese soll abhängig von der anstehenden Geologie, indikative Hinweise auf die mit den unterschiedlichen Bohrverfahren erzielbaren Bohrgeschwindigkeiten und -abweichungen geben. Des Weiteren soll ein Überblick über die sich derzeit am Markt befindenden Vermessungssysteme sowie deren Funktionsweise im Hinblick auf den Bohrvorgang gegeben werden. Der zweite Teil der gegenständlichen Arbeit befasst sich mit Verfahrensparametern, die während der Bohrung aufgezeichnet werden, wie etwa dem Anpressdruck, dem Drehmoment, dem Spüldruck oder dem Bohrfortschritt. Es wird versucht, die Frage zu klären, welchen Einfluss die Gebirgseigenschaften – wie etwa die Nachbrüchigkeit – auf die Richtbarkeit beziehungsweise die Steuerbarkeit von Bohrungen haben. Das Ziel ist es, die maßgeblichen geologischen Eigenschaften durch die Analyse der Bohrdaten zu identifizieren. Hierfür wird versucht die gewonnenen Bohr- sowie Vermessungsdaten zu eichen, um diese in weiterer Folge analysieren und interpretieren zu können.

Die Analyse soll so erfolgen, dass zu Beginn jene Bereiche der Bohrung herausgefiltert werden, in denen Steuerversuche stattgefunden haben. In einem weiteren Schritt sollen drei verschiedenen Gebirgsbereiche definiert werden. Die Definition dieser Bereich soll anhand des optischen Zustandes der Bohrlöcher erfolgen. Die hierfür notwendigen Informationen lassen sich aus der Analyse der Kamerabefahrungen generieren. Im nächsten Schritt sollen die Abschnitte in denen erfolgreiche Steuermanöver ausgeführt wurden, den definierten Bereichen zugeordnet werden. Anhand dieser Zuordnung soll festgestellt werden in welchen Bereichen mit dem größten Erfolg gesteuert werden kann. Das gewünschte Ziel ist es, anhand dieser Bereiche, Grenzwerte in den Bohrdaten zu definieren mit denen es möglich ist, während des Bohrvorgangs zu erkennen, ob in der aktuellen Tiefenstufe eine Richtungsänderung herbeigeführt werden kann. In einem weiteren Schritt sollen die aus der Interpretation der Bohrdaten gewonnenen Erkenntnisse an einem geeigneten Abschnitt überprüft werden.

Der abschließende Teil der Arbeit soll einen kurzen Ausblick auf weiterführende Möglichkeiten der Analyse von Bohrdaten geben. Der Fokus liegt dabei vor allem darauf, welche zusätzlichen Daten benötigt werden, um weitere Erkenntnisse zu gewinnen.

Teil I

Allgemeine Bohrtechnik

Kapitel 1

Geschichte der Bohrtechnik

1.1 Altertum

Das Seilschlagbohren ist die älteste Bohrtechnik der Welt. Dieses Verfahren wurde bereits in der Zeit vor Christus in China zur Erbohrung von Sole, Erdöl und Erdgas verwendet. Schon damals war es möglich Bohrungen bis zu 1000 m tief abzuteufen. Hierfür war jedoch eine Bohrzeit von bis zu 10 Jahren notwendig. Gebohrt wurde damals vermutlich bereits mit stählernen Meißeln, die an aus Bambusfasern gefertigten Seilen mit Hilfe von Schwengeln auf- und abwärts bewegt wurden. Der Antrieb dieser Schwengel erfolgte durch Menschenkraft [47]. Neben der menschlichen Arbeitskraft wurden auch Tiere eingesetzt. Mit Hilfe von Wasserbüffeln wurden die Schöpfgefäße in und aus dem Bohrloch gefördert, indem sie die Förderseile, welche an senkrecht stehenden Seiltrommeln befestigt waren, abhängig von der Drehrichtung, auf- oder abwickelten [2].

1.2 Neuzeit

1.2.1 17. Jahrhundert

Im Jahr 1640 brachte *Pallisy* das Seilschlagbohren nach Europa [47]. Mit diesem Verfahren bohrte er nach Wasser. 1640 teufte er in der Grafschaft Artois und Modena Bohrungen ab, aus denen frei fließendes Wasser zu Tage trat. Derartige Bohrungen, aus denen frei fließendes Wasser zu Tage trat, wurden von nun an als artesische Brunnen bezeichnet [74].

1.2.2 18. Jahrhundert

Ende des 18. Jahrhunderts wurden Bohrungen nach dem „Kanadischen Bohrverfahren“ abgeteuft. Bei diesem Verfahren musste vor Beginn der eigentlichen Bohrung ein Schacht errichtet werden, der im besten Fall bis zum standfesten Gebirge reichte. In diesem Schacht wurde zur späteren Führung des Bohrgestänges eine hölzerne Bohrröhre, der Bohrstock, eingebaut. Dieser erfüllte sowohl die Aufgabe eines Standrohres, als auch jene eines Bohrtisches. Gebohrt wurde mit einem eisernen Gestänge mit quadratischem Querschnitt. Dieses Gestänge war über eine Kette mit dem Kopf des Bohrschwengels verbunden. Abhängig von der Teufe der Bohrung wurde der Bohrschwengel von 2 - 8 Arbeitern bis zu 40 Mal pro Minute auf- und abbewegt, während der Bohrmeister das Gestänge nach jedem Schlag umsetzte. Die mit diesem Verfahren erreichbaren Bohrtiefen betragen bis zu 300 m, bei einer durchschnittlichen Bohrleistung von 0,30 m pro Tag. Der Umstand, dass zur Reinigung der Bohrlochsohle der gesamte Bohrstrang ausgebaut werden musste, bedingte eine geringe Bohrleistung. Aufgrund des starren Gestänges wurde beinahe die gesamte Schlagenergie, die beim Auftreffen des Meißels auf die Bohrlochsohle frei wurde, wieder auf das Gestänge übertragen. Dies führte oft zu einer Überbeanspruchung, welche mit Gestängebrüchen einher ging [47].

1.2.3 19. Jahrhundert

Fauvelle beobachtete 1833 bei einer Bohrung, die auf artesisches Wasser gestoßen war, dass das Bohrgut vom Wasser nach Obertage gefördert wurde. Diese Entdeckung führte zum Einsatz von Spülungen, die vom Bohrlochmund aus eingebracht wurden und das Bohrgut zu diesem förderten. Durch den Einsatz der kontinuierlichen Spülung konnten Bohrleistungen von bis zu 30 cm pro Stunde erreicht werden.

Im Jahr 1834 entwickelte *von Oyenhausen* ein in sich verschiebliches Wechselstück, die sogenannte „Rutschschere“. Deren Einbau reduzierte die Beanspruchung des Bohrgestänges, da sich beim Auftreffen des Meißels auf die Bohrlochsohle das Gestänge in der Rutschschere zusammenschiebt und dadurch die Beanspruchung auf das übrige Gestänge minimiert wird. Durch die verringerte Belastung des Gestänges wurde es möglich, dieses schlanker und somit auch leichter auszuführen [47].

Im Jahr 1849 wurde von *Fabian* und *Kind* etwa zeitgleich das Abfallstück oder Freifallgerät eingeführt, welches das „Kanadische Bohrverfahren“ noch einmal wesentlich verbesserte. Der grundlegende Gedanke hinter dieser Erfindung war es, die Wirkung des Meißels auf die Bohrlochsohle zu erhöhen, indem man hinter diesem eine Schwerstange anordnete. Dadurch konnte die Fallgeschwindigkeit erhöht werden [47].

Durch die Erfindung der Dampfmaschine Mitte des 19. Jahrhunderts wurde die Voraussetzung geschaffen, die menschliche Arbeitskraft von den schwersten Bohrarbeiten abzulösen. Dies war die Grundlage, um Bohrungen schneller in größere Tiefen abzuteufen [47].

Mrtensen (1855) und *Terp* (1869) waren die Ersten, die die drehende Bohrtechnik mit einer Spülung kombinierten, was die Grundlage für das heute gebräuchliche Rotary Verfahren lieferte [47].

In den Vereinigten Staaten von Amerika wurde 1860 erstmals mit dem sogenannten „Pennsylvanischen Bohrverfahren“ nach Salz gebohrt. Im Gegensatz zur „Kanadischen Methode“ war hier das Übertragungselement vom Bohrschwengel zum Meißel ein Seil. Dies brachte im Vergleich zum Bohren mit einem starren Gestänge den Vorteil mit sich, dass der Meißel viel schneller ausgebaut werden konnte, um anschließend die Bohrlochsohle vom Bohrklein zu reinigen. Dieses Verfahren hat sich bis heute am Markt gehalten [47].

Leschot erhielt 1862 ein Patent auf die von ihm entwickelte Diamantbohrmaschine. Die ersten Modelle wurden noch händisch betrieben, während spätere Modelle hydraulisch angetrieben wurden [47].

In Pennsylvanien wurde 1870 eine Bohrung mit einem Diamantmeißel auf 220 m abgeteuft. In Europa wurden die ersten Bohrungen mit Diamantmeißeln 1874 in Rheinfelden niedergebracht [47].

Im Jahr 1873 wurde *Cross* das Patent für eine einstufige Turbine zum Antrieb eines Bohrmeißels verliehen [47].

Anton Raky erkannte 1899, dass beim gewöhnlichen Freifall die Leistung in großen Tiefen sehr beschränkt war. Er entwickelte ein Verfahren, bei dem weiterhin mit starrem Gestänge gebohrt wurde. Dieses sollte jedoch federnd, in großer Höhe aufgehängt werden. Dadurch war es möglich, das Gestänge nur auf Zug zu beanspruchen. Dies machte es einfacher, das Gestänge mit dem Meißel

zu verbinden und das Gestänge - im Gegensatz zum Bohrverfahren mit Rutschschere oder Freifall - mehr zu schonen. Mit diesem Verfahren konnten Bohrungen bis auf 1500 m abgeteuft werden [47].

1.2.4 20. Jahrhundert

Anton *Lucas* war der Erste, der eine Rotary-Bohrung niederbrachte, als er 1901 am Spindle Top nach Öl bohrte. Kennzeichnend für das Rotary-Bohrverfahren sind das regelmäßig gedrehte Hohlgestänge, das den Bohrmeißel mit konstantem Druck gegen die Bohrlochsohle drückt und die Bohrspülung, die kontinuierlich eingebracht wird, um das Bohrklein auszutragen [47].

Zu einer sprunghaften Entwicklung und einer weiteren Ausbreitung des Rotary-Bohrens führte die Entwicklung des Rollenmeißels von *Hughes* 1909. Der Einsatz des Rollenmeißels erhöhte die Bohrgeschwindigkeit im Vergleich zum „Fishtail Bit“ um ein Vielfaches [7]. Beim „Fishtail Bit“ handelt es sich um einen Blattmeißel mit einer geteilten Schneide. Ein solche Meißel ist in Abbildung 1.1 ersichtlich. Diese Meißelform eignet sich nur zum Bohren in lockeren Formationen. Beim Bohren von härterem Gestein waren nur sehr geringe Bohrleistungen möglich, da es immer wieder zu Gestängebrüchen kam [2].



Abb. 1.1: „Fishtailbit“ [23]

Das Spülschnellschlag oder auch hydraulische Bohren nach *Wolski* revolutionierte die Kraftübertragung auf den Bohrmeißel. Durch die Einführung dieses Verfahrens musste der Schlagimpuls nicht mehr von der Bohrlafette aus, über das Bohrgestänge bis ins Bohrlochtiefste weitergeleitet werden. Der Schlagimpuls wurde von einem mit Wasser betriebenen Bohrwidder erzeugt, welcher direkt hinter dem Meißel angeordnet war [66]. Der Bohrwidder war ein Motor, der mit Hilfe von Wasser betrieben wurde. Das Wasser wurde mit hohem Druck in den Widder geleitet wo es zur Erzeugung der Schlagenergie mit Hilfe eines Kolbens und einer Feder genutzt wurde [5].

Ab 1920 wurden die ersten Horizontalbohrgeräte Untertage zur Absaugung von Methangas in den Steinkohleflötzen des Ruhrgebiets eingesetzt [8].

Im Jahr 1924 meldete *Sharpenberg* ein Patent für den „Fluid-operated well-drilling apparatus“ einer mehrstufigen Bohrturbine an. Hierbei handelte es sich um eine fluidbetriebene Drehbohrvorrichtung, die am unteren Ende eines nicht drehbaren Bohrstranges angeordnet wurde. Der Unterschied zu den sich bereits am Markt befindenden Bohrturbinen war, dass diese auch von ungeschulten Arbeitern eingesetzt werden konnte [80]. Ein Nachteil dieser hydraulisch betriebenen Bohrturbinen war, dass diese ihr Drehmoment erst bei sehr hohen Drehzahlen entwickelten. Die hohen Drehzahlen waren jedoch für den Einsatz von Rollenmeißeln nicht geeignet [20].

Moineau entwickelte 1932 die Verdrängerpumpe. Diese Pumpe besteht aus einem Statorrohr, welches mit einem Elastomer ausgekleidet ist. In diesem Statorrohr befindet sich ein stählener Rotor. Die Abrollkurve des Rotors bestimmt die Kontur des Elastomers im Stator. Daraus ergibt sich die Ausbildung vieler diskret gegeneinander abgedichteter Kammern, entlang der Längsachse der Pumpe. Durch diese Kammern wird das eingebrachte Fluid durch die Pumpe geleitet. Die Abdichtung der einzelnen Kammern gegeneinander wird durch eine Presspackung sichergestellt, die sich zwischen Rotor und Stator befindet. So wird pro Umdrehung des Motors eine definierte Menge des Fluids durch den Motor gefördert. Dieses Prinzip wird für Bohrlochmotoren verwendet, indem die dem Motor, durch das Bohrgestänge, zugeführte Bohrspülung zur Erzeugung mechanischer Arbeit am Bohrmeißel genutzt wird. Solche Bohrmotoren wurden 1966 erstmalig für Einsätze im Feld hergestellt [9]. Die Bohrturbinen wurden laufend weiterentwickelt, sodass 1959 86,5% der gesamten Bohrungen der UdSSR mit Bohrturbinen ausgeführt wurden. [47].

Im Jahr 1960 war die Entwicklung von diamantenbesetzten Meißeln so weit fortgeschritten, dass diese industriell gefertigt werden konnten [2].

Die erste gesteuerte Horizontalbohrung wurde 1972 in den USA durchgeführt. Dabei handelte es sich um die 180 m lange Unterquerung des Flusses Pajaro in der Nähe von Watsonville [20].

Im Jahr 1980 erfolgte erstmals die Aufzeichnung von Bohrdaten [8]. Bohrdaten werden im Allgemeinen zu Analyse- und Informationszwecken gesammelt. Es wird versucht durch ihre Interpretation Informationen zum Zustand des Gebirges zu gewinnen. Des weiteren werden sie für die Optimierung des Bohrablaufs genutzt und ausgewertet [39].

Die Firma *Terra Ag Tiefbautechnik* meldet 1996 ein Patent für den mit Druckluft betriebenen Imlochhammer an [49].

1.2.5 21. Jahrhundert

Zur Sanierung eines Setzungsschadens an der *Hochgeschwindigkeitsstrecke Berlin – Hannover* wurden 2002 erstmals gesteuerte Sacklochbohrungen eingesetzt. Diese Sanierung erfolgte mit Hilfe von Injektionen. Die Injektionsbohrungen wurden aufgrund der beengten Platzverhältnisse und der großen Anzahl an Leitungen, welche sich im Boden befinden, als gesteuerte flüssigkeitsgestützte Injektionsbohrungen ausgeführt. Als Spülung wurde eine selbst erhärtende Spülung eingesetzt, die in späterer Folge auch als Mantelmischung für die eingestellten Verpressrohrelemente diente [63].

Zur vorausseilenden Sicherung des maschinellen Tunnelvortriebes des *Hallandsastunnels* wurden 2002 Injektionsbohrungen mit einer Länge von bis zu 220 m gebohrt. Neben den hohen Anforderungen an die Lage und Richtungsgenauigkeit der Bohrungen wurde auch eine hohe Anforderung an die Bohrgeschwindigkeit gestellt. Aus diesem Grund wurde eine Kombination aus MUD-Motor

(siehe Teil 2 Kapitel 2.4) und Wassara Bohrhammer (siehe Teil 1 Kapitel 2.1.2.1) eingesetzt, wobei die beiden Systeme abwechselnd zum Einsatz kamen. Der Wassara Hydraulikhammer war für den hohen Bohrfortschritt verantwortlich, während der MUD-Motor eingesetzt wurde, um zu großen Abweichungen entgegen zu wirken und die Lagegenauigkeit der Bohrungen zu sichern [71].

Zur Sicherung des Tunnelvortriebes der *Wehrhahn-Linie* in Düsseldorf wurden 2007 gesteuerte Sacklochbohrungen abgeteuft. Es wurden 107 Gefrierbohrungen mit einer Länge von bis zu 75 m und einem Bohrradius von 450 m gebohrt. Aufgrund der Anforderungen an die Dichtigkeit des Frostkörpers wurden sehr hohe Anforderungen an die Bohrergenauigkeit gestellt. Die maximal zulässige Abweichung lag bei ± 20 cm. Da die Bohrungen mit einem Radius von 450 m ausgeführt wurden, konnte nicht auf ein herkömmliches optisches Vermessungsgerät zurückgegriffen werden. Aus diesem Grund kam ein auf Kreiseln basierendes Vermessungssystem (siehe Teil 1 Kapitel 3.1.3) zum Einsatz [73].

Die ersten gerichteten Bohrungen wurden in der Zeit zwischen August 2007 und April 2008 hergestellt. Bei diesem Bauvorhaben wurden zum Anschluss der Randbezirke von Den Haag, Rotterdam und Zoetermeer an das öffentliche Verkehrsnetz neue Verkehrswege, die *Zoetermeer* sowie die *Hopflein Linie*, errichtet. Hierfür wurden zwei 2,4 km lange Tunnel mittels einer TBM aufgeföhren. Die Tunnelauskleidung erfolgte mit Tübbing. Aus sicherheitstechnischen Aspekten wurden die zwei Tunnelröhren im Abstand von 300 m durch Querschläge verbunden. Da sich diese Querschläge in pleistozänen Sandschichten befanden, die teilweise kiesige Anteile beinhalten und der Grundwasserspiegel nur wenige Meter unter der Geländeoberkante lag, wurden die Querschläge im Schutze einer Vereisung aufzuföhren. Die herzustellenden Querschläge lagen größtenteils unter wichtigen Verkehrsachsen, die hinsichtlich Setzungen besonders beobachtet werden mussten. Die Vereisungsbohrungen, hierbei handelte es sich um jeweils 24 Bohrungen mit Längen zwischen 3 und 9 m, wurden als gerichtete Bohrungen mit verlorenen Bohrrohren ausgeführt. Die verlorenen Bohrrohre wurden als Vereisungsrohre herangezogen. Da bei Vereisungsbohrungen die Lagegenauigkeit der Bohrungen eine wichtige Rolle spielt, um die spätere Dichtigkeit des Vereisungskörpers zu garantieren, mussten die Bohrungen so genau wie möglich ausgeführt werden [95].

Beim Bau der zweiten *Warschauer U-Bahn Linie* zwischen 2010 und 2014 wurden zur Konsolidierung des Bodens Injektionen eingesetzt. Diese Maßnahmen waren zum Schutz der Bauwerke, die über, der mit Hilfe einer TBM aufgeföhrenen, Tunnelstrecke lagen, notwendig. Dafür wurden gesteuerte Sacklochbohrungen von der Oberfläche aus gebohrt. Durch den Einsatz dieser Technik war es möglich die Bohrungen parallel zum Verlauf des Tunnels abzuteufen. Es wurden Bohrlängen zwischen 220,5 und 261,0 m gewählt. Eine weitere Herausforderung bei diesem Projekt war die für die Steuerung der Bohrung unverzichtbare Vermessung der Bohrungen. Aufgrund der geologischen Randbedingungen mussten die Bohrungen mit Hilfe eines an der Oberfläche erzeugten Magnetfeldes (siehe Teil 1 Kapitel 3.2.6) vermessen werden [6].

Im Jahr 2016 wurden zur Herstellung des *Startschachts Sommerau 2* für die Tunnelbauarbeiten am Baulos Semmering-Basistunnel SBT 3.1 vorausseilende Gebirgsabdichtungen in Form von Injektionen ausgeführt, um den Schacht mit einem Innendurchmesser von 8,0 m im Schutz eines Injektionsrings abzuteufen. Insgesamt wurden 33 Injektionsbohrungen mit einer Länge von je 110,0 m als verrohrte, gesteuerte Bohrungen hergestellt [94]. Gemäß der technischen Vertragsbedingungen wurde eine zulässige radiale Abweichung von 30 cm für Bohrungen mit einer Länge von 120 m festgelegt [82]. Die Außenverrohrung dient bei dem vorliegenden Bohrsystem zur Steuerung der Bohrung, während über das Innengestänge der wasserbetriebene Imlochhammer angetrieben wird. Zur Steuerung der Bohrungen standen zwei Verfahren zur Auswahl. Das

Erste sah vor, ein Knickstück mit definiertem Winkel in der Außenverrohrung anzuordnen. Beim zweiten Verfahren sollte die Steuerung mit Hilfe eines Führungsrohres erfolgen, das an der Außenseite einseitig mit Führungsleisten bestückt war. Die Wahl fiel letztendlich auf das System mit dem Führungsrohr, da Vorversuche zeigten, dass das System mit dem Knickstück in der anstehenden Geologie weniger effektiv war. Durch den Einsatz der Führungsschienen war ein stetiges Gegensteuern gegen die Schichtungen der Formation möglich. Beim Antreffen von stark entfestigten Gebirgsbereichen sah man vor den Imlochhammer durch einen abstoßbaren Rollenmeißel oder eine Steuerschaufel zu ersetzen. Nach dem Erreichen der Endteufe war es möglich den Bohrkopf durch den Einbau eines Manschettenrohrs abzustoßen und dieses somit im Schutze der Verrohrung einzubauen. Da die Bohrungen der Einfallsrichtung des Gebirges folgten musste durch laufende Messungen mit darauffolgenden Steuerungsmanövern der Verlauf der Bohrungen laufend korrigiert werden. Vermessen wurden die Bohrungen mit Hilfe des Drill-Pilot®. Hierbei handelt es sich um eine auf faseroptischen Kreiseln und Beschleunigungssensoren aufbauende Messsonde [94].

Kapitel 2

Grundlagen der Bohrtechnik

2.1 Bohrverfahren

Abhängig von der Festigkeit des zu durchörternden Gesteins, der geforderten Tiefe des Bohrlochs und der zulässigen Abweichung des Bohrverlaufs vom geplanten Verlauf, gibt es eine große Auswahl an unterschiedlichen Bohrverfahren. Zusätzlich dazu spielt auch der spätere Zweck der Bohrung eine Rolle bei der Auswahl des Bohrverfahrens. Bohrverfahren lassen sich nach mehreren Gesichtspunkten unterscheiden. So wird zwischen Trocken- und Spülbohrungen oder auch zwischen kerngewinnenden und kernzerstörenden Verfahren unterschieden. Bei Spülbohrungen wird das im Bohrlochtiefsten gelöste Material von der Bohrspülung kontinuierlich zum Bohrlochmund gefördert. Dabei übernimmt die Spülung nicht nur die Aufgabe der Bohrgutförderung, sondern auch die Stützung des Bohrlochs und die Schmierung des Bohrstranges, sowie die Kühlung der Abbauwerkzeuge. Bei der Trockenbohrung wird das an der Bohrlochsohle gelöste Material abhängig vom eingesetzten Abbauwerkzeug, diskontinuierlich oder auch kontinuierlich (Schneckenbohrung) aus dem Bohrloch gefördert [60]. Eine weitere Form von Bohrungen sind verdrängende Bohrungen. Bei dieser Form wird das Material meist mit Hilfe eines Wasserstrahls gelöst und größtenteils in den anstehenden Untergrund verdrängt. Ein kleiner Teil des gelösten Materials wird mit Hilfe der Bohrspülung zum Bohrlochmund transportiert [8].

Des Weiteren lassen sich die Bohrverfahren in drehende, dreh-schlagende und schlagende Verfahren unterscheiden. Die folgende Einteilung der Bohrverfahren erfolgt nach diesen Gesichtspunkten [20]. In dieser Arbeit wird nur auf kleinkalibrige Bohrverfahren mit Durchmessern bis zu 6“ eingegangen. Bohrungen mit derartigen Durchmessern können sowohl für Vereisungs- als auch für Injektionsbohrungen, als verrohrte Bohrungen, verwendet werden. Des weiteren ist in derartigen Durchmessern die Verwendung aller gängigen Vermessungs sonden möglich.

2.1.1 Drehende Bohrverfahren

Drehende Bohrverfahren können weiter in bohrkerngewinnende und bohrkernzerstörende Verfahren unterteilt werden. Zu den kerngewinnenden Bohrverfahren zählen die Rotationskernbohrungen in ihren unterschiedlichen Ausführungsvarianten und die Counterflushbohrungen. Zu den kernzerstörenden Bohrverfahren gehören die Rotarybohrungen, die baugrundverdrängenden Spülbohrverfahren und die Schneckenbohrung, wobei bei der Schneckenbohrung eine Ausführungsvariante mit Kerngewinn möglich ist [19].

2.1.1.1 Mechanische Gesteinslösung

Die Lösung des Gesteinsmaterials erfolgt bei Kernbohrungen, Counterflushbohrungen sowie Rotarybohrungen durch Bohrkronen, die im Bohrlochtiefsten angeordnet sind und das Gestein durch drehend drückende Beanspruchung abbauen. Für den Abbau des Gesteins ist daher das Aufbringen einer Rotationsenergie sowie eines Anpressdrucks notwendig. Die notwendige Rotationsenergie wird mit Hilfe von Kraftdrehköpfen, welche an der Bohrlafette angeordnet

sind, über das Bohrgestänge zur Krone geleitet oder mit Hilfe von MUD-Motoren, welche durch den Spülungsstrom betrieben werden und direkt hinter dem Abbauwerkzeug angeordnet sind, eingebracht (siehe Teil 2 Kapitel 2.4). [44]. Der Anpressdruck wird bei Vertikalbohrungen durch das Gewicht des Bohrstrangs und bei Horizontalbohrungen durch zusätzliche Druckkräfte generiert [2].

Beim Spülbohren oder Jetten erfolgt der Abbau des Gesteins durch die hydraulische Lösearbeit eines hochenergetischen Wasser- oder Spülungsstrahls, der an der Spitze des Bohrkopfes austritt. Ein Teil des gelösten Materials wird von der Spülung zum Bohrlochmund gefördert, der andere Teil wird in den anstehenden Baugrund verdrängt. Durch diese Verdrängung findet eine Verfestigung in der Randzone des Bohrlochs statt, da der Porenraum durch das verdrängte Material verringert wird [8].

Die Lösung des Materials erfolgt bei Schneckenbohrungen durch eine schneidend schabende Beanspruchung [20]. Für diese Form der Gesteinslösung sind hohe Drehmomente erforderlich. Bei Schneckenbohrungen mit größerem Durchmesser oder in harten Formationen ist zusätzlich zum hohen Drehmoment ein hoher Anpressdruck notwendig. In Böden bietet die Schneckenbohrung eine Möglichkeit, Bohrungen zu geringen Kosten abzuteufen. Durch die mechanische Reinigung des Bohrlochs sind keine weiteren Geräte wie etwa Pumpen oder Kompressoren zur Einbringung einer Spülung notwendig. Die Bohrschnecken können abhängig von ihrer Ausführung in Endlos-schnecken, Hohlbohrschnecken - mit diesen ist es möglich Bohrkerne zu erbohren - und kurzen Bohrschnecken unterschieden werden [4].

2.1.1.2 Rotationskernbohrung

Bei Rotationskernbohrungen handelt es sich um Verfahren mit diskontinuierlicher Bohrkerngewinnung. Im Gegensatz zum Rotary-Bohrverfahren wird hier der Bohrkern nicht völlig zerstört [12]. Bei diesen Verfahren wird mit Hilfe einer Hohlbohrkrone unter drehender und drückender Bewegung ein Ringspalt um den zu bergenden Bohrkern gebohrt. Die drehende Bewegung wird dabei mithilfe des Bohrgestänges auf die Bohrkrone übertragen [31]. Dadurch wächst der Bohrkern mit dem Fortschreiten der Bohrung stetig in das Kernrohr hinein.

Mit diesem Verfahren können Bohrtiefen von mehreren hundert Metern erreicht werden [12]. Abhängig von der zum Einsatz kommenden Bohrkrone erfolgt die mechanische Lösung des Gesteins durch Brechen, Abscheren oder Schleifen [20].

Die brechende und abscherende Gesteinszerstörung erfolgt, indem das Bohrwerkzeug unter hoher Belastung in das Gestein eindringt. Dadurch bildet sich ein Spannungszentrum aus. Durch die Rotation des Bohrwerkzeugs kommt es beim Überschreiten der Schubfestigkeit des Gesteins zu einem Abscheren des Materials vor dem Diamanten und der Diamant wandert aus der Spannungszone. Aufgrund der Druckentlastung des Gesteins dringt das unter dem Diamanten gebrochene Material wegen seiner Elastizität an die Oberfläche. Die so entstehenden Risse hinter dem Diamanten erleichtern den Abbau für den folgenden Diamanten. Wird durch die Belastung des Diamantens die Gesteinsfestigkeit um ein Vielfaches überschritten, so bewirkt diese Überschreitung die Ausbildung von Furchen, die eine Querschnittsfläche von bis zu dem Vierfachen der Eindringtiefe des Diamantens aufweisen können [2].

In weichen Formationen wird das Gestein abgeschert, indem mit Hilfe der Diamanten Furchen in der Ortsbrust gezogen werden. Diese Furchen besitzen jedoch in etwa nur die selbe Querschnittsfläche wie die Diamanten selbst, daher führen Diamanten mit scharfen Kanten unter einer geringen Werkzeugbelastung und einer hohen Drehzahl zu guten Ergebnissen beim Bohren in derartigen Formationen. Aus der Art der Gesteinszerstörung lässt sich ableiten, dass in weicheren Formationen geringere Leistungen und Bohrgeschwindigkeiten möglich sind als in

harten. Des Weiteren ist ersichtlich, dass nicht nur die Härte, sondern die Bohrbarkeit als Ganzes die erzielbaren Bohrgeschwindigkeiten bestimmt [20].

Aufgrund ihrer vielfältigen Einsetzbarkeit in allen Böden sind die Rotationskernbohrverfahren, die am häufigsten zum Einsatz kommenden Bohrverfahren. Um einen durchgehenden Kerngewinn zu gewährleisten, müssen gewisse Anforderungen an das Bohrgerät gestellt werden.

Das Bohrgerät muss einen ruhigen, schlagfreien Lauf haben und es muss die Möglichkeit einer Anpressdruck- sowie einer Drehzahlregelung bestehen. Des Weiteren ist das Vorhandensein einer druckdosierbaren Spüleinrichtung unerlässlich [54]. Abhängig von der anstehenden Geologie kommen bei diesen Verfahren unterschiedliche Kronensysteme zum Einsatz [19].

Mit Hilfe von Kernrohren, die im Anschluss ausführlich beschrieben werden, wird der Bohrkern aus dem Bohrlochtiefsten entnommen. Hierfür ist zwischen dem Kernrohr und der Bohrkronen ein Kernfänger angeordnet. Nachdem eine Kernmarsch erfolgreich abgebohrt wurde, wird die Bohrgarnitur angehoben. Dabei verkeilt sich der Bohrkern im Kernfänger und der Kern kann vom anstehenden Gebirge abgerissen werden. Ein Nachteil dieser Kernrohre mit der Ausnahme des Seilkernrohres ist, dass bei jeder Förderung eines Bohrkerns das gesamte Gestänge ausgebaut und nach der Entnahme des Bohrkerns wieder in das Bohrloch eingebracht werden muss [12].

Aufgrund der Dünnwandigkeit der Kernrohre müssen diese aus hochwertigen Werkstoffen hergestellt werden, um ein Verbiegen oder Ausknicken während des Bohr- und Ziehvorgangs zu verhindern. Weiters muss die Innenwand des Kernrohrs möglichst glatt sein, um zu große Reibungswiderstände zwischen Kernrohr und Bohrkern zu verhindern [2].

Einfachkernrohr

Einfachkernrohre werden vorwiegend im homogenen Gebirge eingesetzt. Im kompakten Fels kommen dünnwandige Einfachkernrohre zum Einsatz. Mit diesen ist es möglich, hohe Bohrleistungen zu erzielen. Ein Vorteil dieser dünnwandigen Kernrohre sind die schmallippigen Bohrkronen, durch deren Einsatz die Kosten für das Bohrwerkzeug minimiert werden und höhere Bohrleistungen, im Vergleich zu Doppelkernrohren, erreicht werden können [2]. Einfachkernrohre bestehen aus einem Kernrohr mit einem üblichen Durchmesser von 52 bis 146 mm. Des Weiteren ist der Bohrkern Durchmesser verglichen mit dem von Doppelkernrohren bei gegebenem Bohrlochdurchmesser aufgrund der geringeren Wandstärke größer. Eine Grundvoraussetzung für die Anwendbarkeit von Einfachkernrohren ist, dass das anstehende Gebirge unempfindlich gegen Ausspülungen durch die mit hoher Geschwindigkeit vorbeifließende Bohrspülung sowie gegen die ständige Rotation des Kernrohrs ist. Ansonsten wird die Qualität der gewonnenen Proben sehr vermindert. In tonigen Formationen besteht mit diesem Verfahren die Gefahr des Quellens des Bohrkerns. Dies führt zu einem Verklemmen des Bohrkerns im Kernrohr und in weiterer Folge zu einem Zermahlen des Kerns [45]. Der schematische Aufbau eines Einfachkernrohrs ist in Abbildung 2.1a ersichtlich. Während der Bohrung befindet sich der Kernfangring im oberen konisch geformten Teil der Bohrkronen, sodass der Bohrkern ungestört vorbeigleiten kann. Sobald die Bohrgarnitur angehoben wird, rutscht der Kernfänger nach unten und sorgt dafür, dass sich der Bohrkern mit diesem verklemmt und der Kern gezogen werden kann [19].

Doppelkernrohr

Hierbei handelt es sich um eine Verbesserung des Einfachkernrohrs, die den Kern vor den hydraulischen und mechanischen Einflüssen schützt. Zu diesem Zweck besteht dieses System aus zwei drehbar gegeneinander gelagerten Rohren. Dadurch ist es möglich die mechanische Beanspruchung des Bohrkerns zu eliminieren [45]. Der Aufbau eines Doppelkernrohrs ist in Abbildung 2.1b ersichtlich. Die Bohrspülung wird zwischen den beiden Rohren zum Bohrlochtiefsten geleitet. Aus diesem Grund kommt der Bohrkern erst im Bohrlochtiefsten mit der Bohrspülung in Kontakt.

Dreifachkernrohr

Dieses System eignet sich besonders zur Entnahme von Bodenproben in harten, sehr brüchigen bis extrem weichen Formationen. Bei diesem Verfahren wird der Bohrkern zusätzlich von einer dritten Verrohrung gestützt [19]. Hierbei handelt es sich in den meisten Fällen um dünnwandige, geschlitzte Rohre. Eine Verwendung von Plastiklinern ist ebenfalls möglich [54]. Der Aufbau eines solchen Kernrohres ist in Abbildung 2.2 ersichtlich.

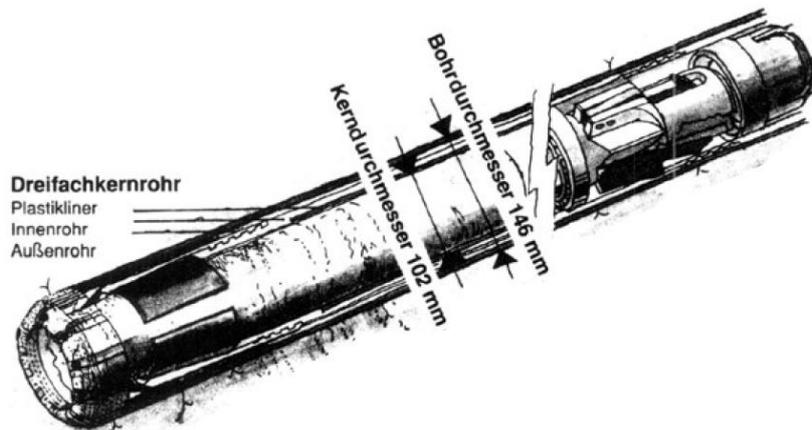


Abb. 2.2: Dreifachkernrohr [19]

Seilkernrohr

Bei Seilkernrohren handelt es sich um Doppel- oder Dreifachkernrohre, bei denen es möglich ist das Innenrohr mit Hilfe eines Seiles ein- und auszubauen. Dadurch kann der Bohrstrang während der Kernentnahme im Bohrloch verbleiben [20]. Neben dem Vorteil einer großen Zeiteinsparung können auch Bohrlochverstürze in gebrächen Formationen verhindert werden. Dies wird durch die im Bohrloch verbleibende Verrohrung erreicht. Daher entfällt ein etwaiges Wiederaufbohren [45].

Zur Bohrkernentnahme wird eine an einem Seil befestigte Fangvorrichtung in das Bohrloch gelassen. Das Innenrohr rastet an dieser Fangvorrichtung (Abbildung 2.3) ein und wird durch die Zugkraft entriegelt [12]. Bei Horizontalbohrungen oder stark geneigten Bohrungen wird die Fangvorrichtung bis zum Außenkernrohr gepumpt [19]. Dadurch bringt der Einsatz von Seilkernrohren ab einer Bohrtiefe von 20 m im Hinblick auf die Bohrdauer große Vorteile mit sich. Ein Nachteil dieses Systems ist jedoch, dass bei gleichem Kerndurchmesser im Vergleich mit den anderen Kernbohrverfahren viel größere Außendurchmesser erbohrt werden müssen. Dies ist durch die größeren Wandstärken der einzelnen Rohre bedingt [12]. Der schematische Aufbau eines Seilkernrohres ist in Abbildung 2.3 ersichtlich.

2.1.1.3 Counterflushbohrung

Bei diesem Verfahren handelt es sich ebenfalls um ein Drehbohrverfahren, mit dem im Vergleich zu den Rotationskernbohrungen ein kontinuierlicher Kerngewinn möglich ist. Die Counterflushbohrung entwickelte sich aus dem Gegenstromschlagbohren und wird vorwiegend im Steinsalz und Kalibergbau eingesetzt. Die Spülung wird bei diesem Bohrverfahren von einer Kolbenpumpe über einen Drehpreventer in den Ringraum der Bohrung gepumpt. Über den Ringraum fließt die Spülung zum Bohrkopf, von wo aus sie das abgebohrte Gebirge, das in Form von Cuttings oder

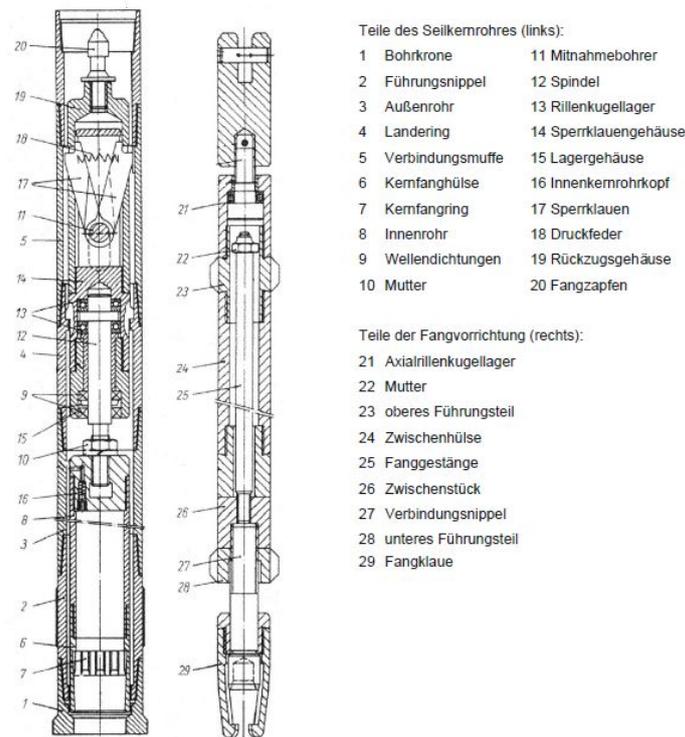


Abb. 2.3: Seilkernrohr [20]

vorzugsweise kurzen Bohrkernen vorliegt, durch das Bohrgestänge zum Kernfangsieb fördert. Die Hauptvoraussetzung für die Einsetzbarkeit dieses Systems ist, dass es zu keinen nennenswerten Spülungsverlusten kommt [19]. Die Ausbildung des Bohrkopfes bei diesem System erfolgt so, dass kurze Bohrkernstücke mit einem Durchmesser zwischen 2,5 und 3 cm erbohrt werden können. Um den Bohrkern vom anstehenden Gebirge zu trennen, muss die Bohrgarnitur kurz angehoben werden. Mit Hilfe des Spülstroms werden die einzelnen Bohrkernstücke zum Bohrlochmund gefördert. Eine Erbohrung von ungestörten Kernen ist mit diesem Verfahren nur in tektonisch ungestörten und sehr harten Schichten möglich [2].

2.1.1.4 Schneckenbohrung

Schneckenbohrungen werden ebenfalls als Drehbohrungen ausgeführt. Beim Bohren mit geschlossener Spitze wird ein Teil des erbohrten Bodens verdrängt, während der andere Teil kontinuierlich über die Wendel aus dem Bohrloch befördert wird [19]. Bohrschnecken werden unter anderem für folgende Arbeiten eingesetzt:

- Aufschlussbohrungen mit durchgehender Entnahme von Bohrproben,
- Überlagerungsbohrungen, um im Anschluss Kern- oder Rotarybohrungen abzuteufen,
- Brunnen- und Pegelbohrungen,
- Verpress- und Injektionsbohrungen und
- Ankerbohrungen [19].

Mit diesem Verfahren ist es möglich durch den Einsatz von Hohlbohrschnecken Bohrkern zu erbohren. Bei der Verwendung von Endlosschnecken wird die gesamte Bohrschnecke in den Boden gedreht, die Lösung des Gesteins erfolgt durch eine scherende und reißende Beanspruchung. Die Wirkungsweise der scheren Gesteinszerstörung wurde in Kapitel 2.1.1.2 beschrieben [4].

Die reißende Gesteinszerstörung kommt vor allem in harten, sehr dicht gelagerten Böden und weichem bis hartem Fels zum Einsatz. Bei dieser Art der Gesteinslösung werden durch schräg gestellte Reißzähne Furchen in den Boden oder den Fels gerissen (siehe Abbildung 2.4).

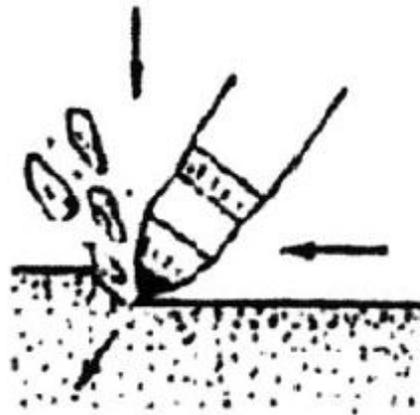


Abb. 2.4: Reißende Gesteinszerstörung [20]

Als Reißzähne werden in den meisten Fällen Rundschachtelmeißel eingesetzt. Um zu vermeiden, dass diese aus ihrer Fassung gerissen werden, sind ein hoher Anpressdruck und Drehmoment notwendig. Dadurch kann gesichert werden, dass der Meißel in den Boden oder Fels gedrückt und durch das aufgebrachte Drehmoment die Reißzähne in ihre Fassung gepresst werden. Mit diesem Verfahren ist es möglich Böden sowie Fels mit Druckfestigkeiten von bis zu 100 MN/m^2 zu lösen [61].

Hohlbohrschnecken werden ebenfalls als Endlosschnecken ausgebildet. Diese weisen Einzellängen von bis zu 10 m auf. Im Vergleich zu den Vollbohrschnecken haben Hohlbohrschnecken ein Seelenrohr. Diese Seelenrohre haben einen Mindestdurchmesser von 80 mm und die am Umfang der Seelenrohre angeschweißten Wendeln weisen Mindestbreiten von 50 mm auf. Daraus ergeben sich Mindestdurchmesser von 180 mm.

Verbunden werden die einzelnen Rohre über selbstdichtende Rechtsgewinde und eine zusätzliche Sicherung verhindert das Lösen der Rohre bei Linksdrehungen.

Für die Bohrschnecken sind abhängig von den anstehenden Formationen verschiedene Bohrköpfe vorhanden. Diese Bohrköpfe können bei Hohlbohrschnecken mit Hilfe einer Fangvorrichtung ausgebaut werden. In vielen Fällen wird auch mit verlorenen Bohrspitzen gebohrt. Diese verlorenen Kronen können durch den Einbau des Produktrohres einfach abgestoßen werden und verbleiben somit im Bohrlochtieferen.

Mit Hohlbohrschnecken alleine ist die Entnahme von Bodenproben nicht möglich, diese sind lediglich ein Hilfsmittel für die Entnahme. Zur Gewinnung von Bohrkernen wird die Bohrung auf die Teufe niedergebracht, aus der die Probe entnommen werden soll, und die Bohrspitze wird mit Hilfe der Fangvorrichtung ausgebaut. Im Anschluss wird die Kernbohrereinrichtung im Innengestänge eingebaut, die gewünschte Kernlänge abgebohrt und die Kernbohrereinrichtung wieder ausgebaut [19]. Die unterschiedlichen Systeme von Hohlbohrschnecken sind in Abbildung

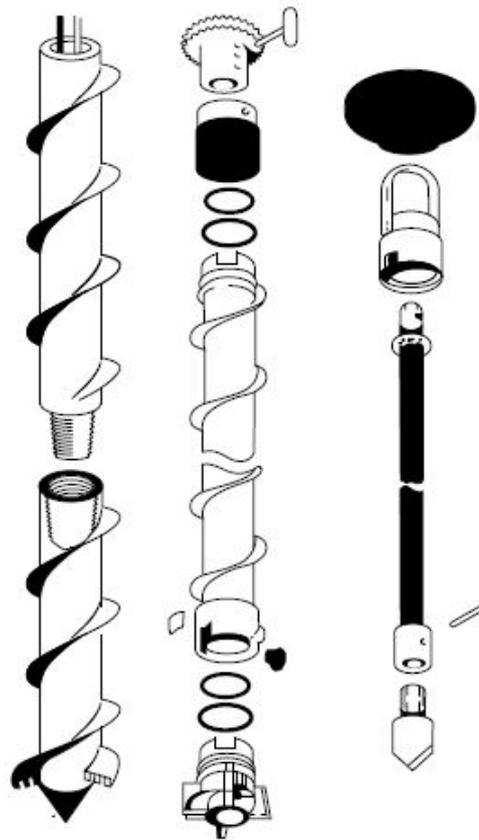


Abb. 2.5: Hohlbohrschnecke mit abstoßbarer Spitze (links), Hohlbohrschnecke für Kernbohrungen (mitte) und Komponenten des SPT Tests [4]

2.5 ersichtlich. Die Abbildung links zeigt eine Hohlbohrschnecke mit abstoßbarer Spitze und einer mit Reißzähnen besetzten Wendel. Die Abbildung in der Mitte zeigt eine Hohlbohrschnecke, mit der es möglich ist, Bohrkerne zu erbohren. Eine andere Möglichkeit hierfür ist wie bereits erwähnt der Ausbau der Bohrspitze und der Einbau von Seilkernrohren oder gewöhnlichen Kernrohren. Die rechte Grafik zeigt die Komponenten die zur Ausführung des Standard Penetration Tests notwendig sind. Diese können ebenfalls in das Seelenrohr eingebaut werden, um den Untergrund auf diese Art zu beproben. Ein weiterer Vorteil von Hohlbohrschnecken ist, dass harte Schichten durch den Einbau eines mit einer Diamantbohrkrone bestückten Kernrohrs durchörtert werden können [4].

2.1.1.5 Rotarybohrung

Dieses Verfahren stammt ursprünglich aus der Tiefbohrtechnik. Durch mobile und kleinere Bohrgeräte wurde es an die Bedürfnisse des Bauwesens angepasst. Bei diesem Verfahren muss zwischen einem Antrieb der Bohrohre an der Lafette des Bohrgeräts und dem Einsatz eines Bohrmotors, der den Meißel im Bohrloch tiefsten antreibt, unterschieden werden. Die Wirkprinzipien der mechanischen Gesteinszerstörung und die zum Einsatz kommenden Abbaugeräte sind aber bei beiden Antriebsarten die gleichen. Die mechanische Gesteinszerstörung findet bei diesen Verfahren unter drehend-drückender Beanspruchung statt. Die notwendige Rotationsenergie wird entweder durch einen an der Lafette des Bohrgeräts befestigten Kraftdrehkopf, der gleichzeitig

die Spülung über das Gestänge ins Bohrlochtiefste fördert, oder im Bohrlochtiefsten durch einen sogenannten MUD-Motor erzeugt. Die Funktionsweise von MUD-Motoren wird in Teil 2 Kapitel 2.4 näher erläutert. Der zur Zerstörung des Gesteins notwendige Anpressdruck wird bei vertikalen Bohrungen durch das Gewicht des Bohrstranges und bei horizontalen Bohrungen durch den Vorschub des Bohrschlittens generiert, der an der Lafette befestigt ist [2].

Rollenmeißel

1908 erfand Howard Hughes den Rollenmeißel, da die bis dahin eingesetzten Blattmeißel den Anforderungen der Tiefbohrtechnik nicht mehr gerecht wurden [9]. Der Unterschied zwischen dem Rollenmeißel und anderen Abbauwerkzeugen liegt darin, dass während des Abbauvorganges mit dem Rollenmeißel die konischen Meißelrollen, die beweglich am Bohrstrang angeordnet sind, an der Bohrlochsohle abrollen. Die Meißelrollen sind so ausgebildet, dass pro Umdrehung des Bohrstranges alle Punkte der Bohrlochsohle einmal mit den Meißelstiften in Kontakt stehen. Diese Meißelstifte erzeugen beim Abrollen kraterartige Vertiefungen in der Bohrlochsohle [2].

Die mechanische Gesteinszerstörung mit Rollenmeißeln erfolgt durch eine kerbende und scheidende Beanspruchung. Durch den hohen Anpressdruck, der auf den Rollenmeißel wirkt, werden Kerben in die Ortsbrust eingebracht. Durch das Abrollen auf der Bohrlochsohle wird eine Scherbeanspruchung in das Gestein eingeleitet. Die einzelnen Phasen der Gesteinszerstörung mit Rollenmeißeln sind in Abbildung 2.6 dargestellt und laufen folgendermaßen ab: Zuerst kommt es bei der Belastung der Meißelzähne zu einer elastischen Deformation in der Kontaktzone zwischen Gestein und Meißelzahn (a,b). Durch die zunehmende Belastung entsteht eine Zone aus zermahlenem Gestein unter dem Zahn (c). Sobald das belastete und pulverisierte Gestein keine weitere Belastung mehr aufnehmen kann, werden die einwirkenden Kräfte in das benachbarte Gestein umgelagert (d). In der letzten Phase kommt es zur Entstehung von Scherkräften, die das Versagen des Gesteins verursachen (e) [55].



Abb. 2.6: Phasen der Gesteinszerstörung mit Rollenmeißeln [55]

Rollenmeißel gehören zu den beliebtesten Abbauwerkzeugen, da sie vergleichbar günstig sind und sehr gut an die unterschiedlichen geologischen Verhältnisse angepasst werden können. Vor allem beim Bohren im Festgestein spielen sie eine sehr wichtige Rolle. In Abbildung 2.7 ist der Aufbau eines Rollenmeißels zu erkennen. Der Grundkörper eines Rollenmeißels besteht aus drei geschmiedeten Teilen, den sogenannten Pratzten (siehe Abbildung 2.7 1), die zu einem Teil zusammengeschweißt werden. Die Meißelrollen (siehe Abbildung 2.7 2) werden an den Lagerzapfen befestigt, die sich am unteren Ende des Pratzens befinden. Abhängig vom zu erbohrenden Gebirge werden die Meißelrollen unterschiedlich ausgeführt. Die Kugellager (siehe Abbildung 2.7 3), die die Rotation der Meißelrollen sicherstellen, sind das sensibelste Bauteil von Rollenmeißeln. Diese müssen, um für eine möglichst lange Standzeit des Meißels zu sorgen, regelmäßig geschmiert werden. Aus diesem Grund ist in modernen Rollenmeißeln ein mit Schmierfett gefülltes Reservoir an den Lagerungen der Rollen (siehe Abbildung 2.7 4) angeordnet [2].

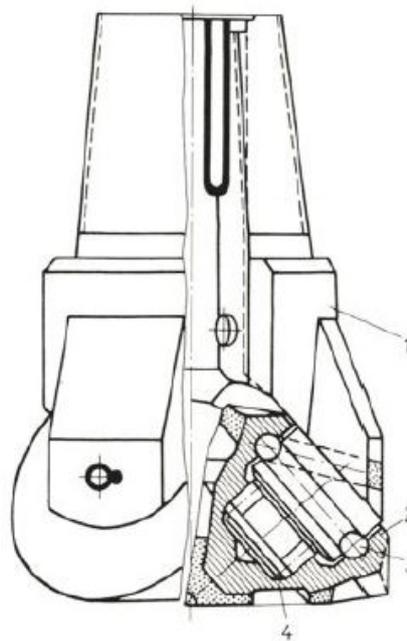


Abb. 2.7: Aufbau eines Rollenmeißels [20]

Bei der Anordnung der Meißelrollen zueinander gibt es beim Dreierrollenmeißel verschiedene Varianten. Der Schnittpunkt der Rollen liegt entweder in der vertikalen Achse des Meißels oder die Achsen sind um einen gewissen Betrag zueinander parallel verschoben und es gibt keinen gemeinsamen Schnittpunkt der Achsen der Meißelrollen. In diesem Fall bilden die Achsen der Rollen ein gleichwinkliges Dreieck. Die Verschiebung der Achsen, welche in Abbildung 2.8 ersichtlich ist, wird als „Offset“ bezeichnet. Abhängig von der anstehenden Formation kommen Meißel mit unterschiedlich großen Offsets zum Einsatz. So werden Meißel mit mittlerem Offset, das heißt, dass der Betrag der Achsenverschiebung zwischen 1,6 und 3,2 mm liegt, vorwiegend in mittelharten Formationen eingesetzt. Meißel mit großem Offset (9,5 mm) kommen in weichen Formationen zum Einsatz. Größere Offsets ermöglichen, dass eine größere Spülmengenge an den Meißelrollen vorbeifließt und diese somit besser vom Bohrklein gereinigt werden [2].

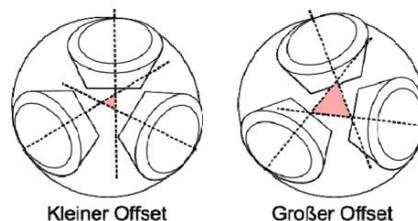


Abb. 2.8: Offset von Rollenmeißeln [93]

Um zu verhindern, dass es zu einer Nachzerkleinerung der bereits abgebauten Cuttings und somit einer unnötigen Erhöhung des Verschleißes kommt, kommt der Bohrspülung bei diesem Verfahren eine wichtige Funktion zu. Rollenmeißel sind aus diesem Grund mit Düsen ausgestattet, aus denen ein hochenergetischer Spülmengenge auf die Bohrlochsohle gelenkt wird. Dies führt einerseits zu einer zusätzlichen Zerkleinerung des Bohrkleins und andererseits zum Abtransport

der Cuttings. Eine zusätzliche Funktion, die den Düsen zukommt, ist die Verhinderung von Verschmutzungen der Meißelrollen [9]. Abhängig von der Härte der anstehenden Formation gibt es unterschiedliche Ausführungen von Rollenmeißeln.



Abb. 2.9: Rollenmeißel für weiche, mittlere und harte Formationen [93]

- **Weiche Formationen:** Zum Abbau weicher Gesteine sind die Flanken der Zähne des Rollenmeißels vergleichsweise spitzer, deren Höhe größer, während die Anzahl der Zähne im Allgemeinen geringer ist. Dadurch ergeben sich größere Abstände zwischen den Zähnen, sodass diese von größerem Bohrklein freigespült werden können. Da der Meißel schon unter einer geringen Druckbelastung tief in die Bohrlochsohle eindringt, würde ein geringer Abstand der Zähne dazu führen, dass das plastische Bohrklein zwischen diesen kleben bleibt. Dies führt in weiterer Folge zu einer Verringerung der Bohrgeschwindigkeit (siehe Abbildung 2.9 links) [47].
- **Mittelharte Formationen:** Für mittelharte Gesteine muss im Vergleich zu weichen Gesteinen mehr Kraft aufgebracht werden, um das Eindringen der Meißelzähne in die anstehende Formation zu gewährleisten. Aus diesem Grund ist die Eindringtiefe geringer und die Kraft, die auf die Spitze des Zahnes wirkt größer [38]. Aus diesem Grund werden für derartige Formationen Meißel mit sowohl kleineren Zähnen als auch kleinerem Offset eingesetzt (siehe Abbildung 2.9 in der Mitte) [47].
- **Harte Formationen:** Da die erbohrten Cuttings in harten Formationen im Allgemeinen kleiner sind, werden Rollenmeißel für sehr harte Gesteine mit kleineren, stumpferen und enger beieinander liegenden Zähnen ausgebildet. In harten Formationen kommen auch sogenannte Warzenrollenmeißel zum Einsatz. Der Unterschied zu gewöhnlichen Rollenmeißeln liegt in der Bezeichnung der Meißelrollen. Beim Warzenrollenmeißel werden Hartmetallstifte in vorgebohrte Löcher so eingepresst, dass nur noch der abgerundete Kopf dieser Stifte aus der Rolle hervorsteht (siehe Abbildung 2.9 rechts) [20].

Diamantmeißel

Da die beweglichen Teile des Rollenmeißels verschleifen und in weiterer Folge versagen können, ist es möglich, dass sich diese Teile vom Rollenmeißel lösen und im Bohrloch verbleiben. Dies ist mit kostspieligen Bergungsaktionen verbunden, da nicht weitergebohrt werden kann, solange sich die harten Metallteile im Bohrloch befinden. Aus diesem Grund wurde der Diamantmeißel entwickelt.

Dieser Meißel hat keine beweglichen Teile. Seine Oberfläche ist mit Diamanten bestückt, daher ist auch die Zerstörung aller Gesteine möglich. Die Diamantmeißel können abhängig von ihrer Herstellung in Oberflächenbesetzte-, imprägnierte und PDC-Meißel unterschieden werden [9]. Um wie schon beim Rollenmeißel eine Nachzerkleinerung der Cuttings zu vermeiden und zusätzlich die Diamanten zu kühlen, werden in den Diamantmeißeln Spülungskanäle angeordnet [47]. Bei der mechanischen Gesteinszerstörung mit Hilfe von Diamantmeißeln können vier Vorgänge unterschieden werden. Diese treten bei allen Meißelformen auf:

- Spanen,
- Zermahlen,
- Schleifen sowie
- Druck-Zug Wechselbelastung.

Bei der spanenden Gesteinszerstörung wird das Gestein wie von einem Pflug vor der Schneide des Meißels abgeschert. Energetisch ist dieser Vorgang günstiger als eine drückende Lösung, da die Scherfestigkeit harter Gesteine um ein Vielfaches geringer als ihre Druckfestigkeit ist. Die Grundvoraussetzung für die spanende Gesteinszerstörung ist ein hoher Anpressdruck damit die Schneide des Meißels in das Gestein gedrückt wird [38]. Die spanende Gesteinszerstörung ist in Abbildung 2.10 dargestellt.

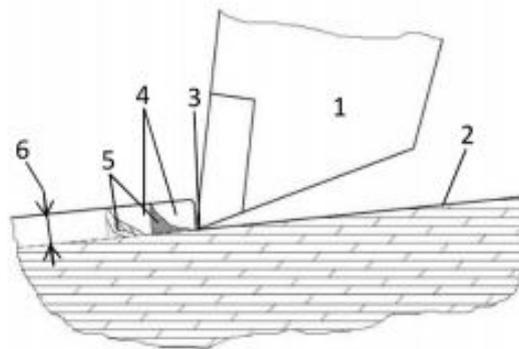


Abb. 2.10: Spanende Gesteinszerstörung aus: [58] 1. Hartmetallschneide 2. Ortsbrust, 3. gelöste Cuttings, 4/5. große und kleine abgescherte Chips, 6. Spandicke

Bei dieser Art der Gesteinszerstörung wird ein Span des Gesteinskörpers durch ein translatorisch oder rotatorisch arbeitendes Werkzeug abgehoben. Aufgrund dieser Arbeitsweise bilden sich vor der Schneidkante durch die Erzeugung lokaler Spannungen Mikrorisse aus. Durch die Steigerung der örtlichen Spannungen kommt es zu einem Rissfortschritt, der nach der Überwindung der lokalen Festigkeit zur Ausbildung von Bruchflächen führt. Abhängig vom Gestein und dem

eingesetzten Bohrwerkzeug ist die Überschreitung der Schubfestigkeit oder die durch Biegung eingeleiteten Druck- oder Zugspannungen für die Bildung der Bruchflächen maßgebend [59].

Beim Zermahlen wird das unter der Diamantschneide der Bohrkronen befindliche Gestein durch die Überschreitung der Druckfestigkeit bis auf die Größe von Feinstaub zermahlen. Dies geschieht vorwiegend bei oberflächenbesetzten Meißeln in deren Riefengrund [38]. Die Ausbildung der Riefen ist in Abbildung 2.11 dargestellt. In 1 ist die Erstbelastung ersichtlich, in 2. die Entstehung von Rissen und Kratern, in 3 und 4. die Ausbildung von Rissen, Spänen und Furchen [20].

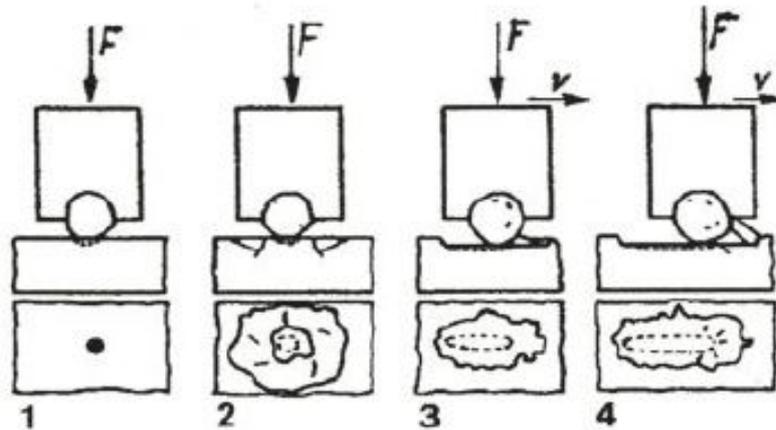


Abb. 2.11: Riefenbildung unter einem Diamantkorn aus: [20]

Die Zerstörung durch das Abschleifen geschieht durch die Reibung zwischen den Diamanten und dem anstehenden Gestein [38]. Dieser Effekt tritt nur in sehr harten, abrasiven Formationen auf, wo das Gestein durch den Effekt des Schleifens zerstört wird [20].

Die Gesteinszerstörung durch den Wechsel von Druck- und Zugbeanspruchungen geschieht indem das Bohrwerkzeug unter dem Anpressdruck gleichmäßig über die Bohrlochsohle gleitet. Beim Weiterdrehen des Meißels kommt es zu einer Entlastung des Gesteins, in welches zuvor durch die Schneide Druckspannungen eingeleitet wurden. Diese Entlastung bedingt die Entstehung von Zugspannungen, die zum Absplittern des Gesteins führen [38].

- Oberflächenbesetzte Meißel: Hierbei handelt es sich um Bohrmeißel, bei denen Naturdiamanten in eine hochverschleißfeste Matrix eingebettet sind (siehe Abbildung 2.12).

Mit der Zunahme der Abrasivität des zu erbohrenden Gesteins steigt die Festigkeit der Matrix, da eine zu starke Abnutzung dieser einen Verlust der Diamanten bedingen könnte. Um dies zu vermeiden, werden die verwendeten Diamanten zu $2/3$ ihrer Höhe in die Matrix eingebettet. Der aus der Matrix herausragende Teil der Diamanten wird „Exposure“ genannt. Dies ist der zur Lösearbeit genutzte Teil der Diamanten [47]. Die Verwendung von natürlichen Diamanten bedingt die aufwendige Herstellung der Meißel, da diese zumeist in Handarbeit erfolgt [78].

Bei dieser Meißelform gibt es verschiedene Ausführungen, die sich durch die Härte der Matrixmaterialien und die Größe und Form der eingesetzten Diamanten unterscheiden [47].



Abb. 2.12: Oberflächenbesetzte Meißel [93]

- PDC-Meißel: Der Name PDC stammt aus dem Englischen und bedeutet *Polycrystallin Diamond Cutters* (siehe Abbildung 2.13). Bei den zum Einsatz kommenden Diamanten handelt es sich um synthetisch hergestellte Industriediamanten. Abhängig von ihrem späteren Einsatzgebiet werden diese Diamanten entweder als runde oder dreieckige Platten ausgeführt. Die Platten werden anschließend auf metallische Trägerplatten aufgelötet. Diese industrielle Herstellung ermöglicht, dass alle Diamanten die selbe Größe besitzen und daher im Vergleich zu Naturdiamanten sehr viel einfacher zu verarbeiten sind [78]. Die mit den synthetischen Diamanten besetzten Trägerplatten werden an den sogenannten „Flügeln“ der Meißel angeordnet. Abhängig von der Anzahl der Flügel, der Größe der einzelnen Schneidelemente und der Anzahl dieser Schneidelemente wird zwischen leicht, mittel und schwer besetzten Meißeln unterschieden [9].



Abb. 2.13: PDC-Meißel aus: [13]

Ähnlich wie Rollenmeißel besitzen auch PDC-Meißel ein seitliches Gauge. Mit zunehmender Länge der Gauge läuft der Meißel schwingungsärmer im Bohrloch. Durch ein kürzeres Gauge sind höhere Aufbauraten, die das Kurvenverhalten im Bohrloch bei Richtbohrarbeiten verbessern, möglich [9].

- Imprägnierte Meißel: Für Gesteine, die mit Hilfe des Rollen- oder PDC-Meißel nicht zerstört werden können, wurden sogenannte imprägnierte Meißel entwickelt (siehe Abbildung 2.14). Bei diesem Meißeltyp werden die Diamanten gleichmäßig in eine Matrix eingebettet [78]. Durch den Verschleiß der Matrix, kommt es zu einer Selbstschärfung des Meißels, da immer wieder neue Diamanten an die Oberfläche treten [47]. Eine Rückgewinnung der Diamanten, die zum Abbau des Gesteins nicht benötigt wurden, ist möglich und wird aus wirtschaftlicher Sicht auch ausgeführt. Die Korngröße der Diamanten in der Krone wird beim Bohren auf die Struktur des anstehenden Untergrundes abgestimmt, so werden zum Bohren in groben Strukturen Körnungen zwischen 100 und 200 Steinen je Karat verwendet, darunter versteht man die Masse der Diamanten. Ein Karat sind 0,2 g Diamant. Mit zunehmender Feinheit der Struktur erhöht sich die Anzahl der eingesetzten Diamanten je Karat. Die eingesetzten Diamanten werden nicht ausschließlich nach ihrer Korngröße, sondern auch nach ihren spezifischen Eigenschaften, wie etwa ihrer Form, ausgewählt. Aus diesem Grund bringt auch bei imprägnierten Meißeln die Verwendung synthetisch hergestellter Diamanten den Vorteil mit sich, dass die gewünschten Eigenschaften bei der Produktion eingestellt werden können.



Abb. 2.14: Imprägnierter Diamantmeißel [48]

Für die Auswahl von imprägnierten Meißeln gibt es folgende Grundsätze:

- Mit zunehmender Härte des Gesteins wird das Bohrwerkzeug weicher
- Mit zunehmender Drehzahl bzw. Schnittgeschwindigkeit nimmt die Härte des Bohrwerkzeugs ab
- Je schlechter die Bohrbarkeit des Gesteins aufgrund von gestörtem Gestein ist und dies auch zu Vibrationen während des Bohrens führen kann und je mehr Leistung das Bohrgerät hat, desto härter muss das Bohrwerkzeug ausgebildet sein.

Die Begriffe *hart* und *weich* beschreiben vorrangig die Härte des Materials der Matrix, in welche die Diamanten eingebettet sind. Für das Erreichen einer hohen Lebensdauer der Meißel wird eine Schnittgeschwindigkeit, die größer als 2 m/s ist, empfohlen. Wichtig ist auch, dass die Meißelbelastung nicht zu hoch gewählt wird, da im Fall einer hohen Meißelbelastung die Krone so tief in den Untergrund eindringt, dass die Spülung die Bohrlochsohle nicht mehr ausreichend reinigen und die Krone kühlen kann [2]. Die Leistung von imprägnierten Meißeln wird vorrangig durch die Kombination aus der Körnung der Diamanten und dem Material der Matrix bestimmt [47].

2.1.1.6 Spülbohrung

Bei dieser Bohrmethode handelt es sich um ein hydraulisch arbeitendes Verfahren. Der Spülungsstrahl tritt beim Spülbohren oder Jetten aus einer oder mehreren Düsen an der Spitze des Bohrwerkzeugs aus. Durch den hohen Druck, mit dem die Spülung aus diesen Düsen austritt, trifft sie mit großer Energie auf die Ortsbrust des Bohrlochs. Durch die kinetische Energie der Spülung ist es möglich, dass diese in feinste Klüfte und Poren des Untergrundes eindringt. Dadurch kommt es zu einer Änderung der in-situ Druckverhältnisse in der Ortsbrust, die ein Aufweiten der Klüfte und Poren bedingt. Dies führt zu einer Reduktion der Standfestigkeit der Ortsbrust. Die hydraulische Lösearbeit der Gesteinspartikel aus ihrem natürlichen Verbund erfolgt dadurch, dass sie von der Spülung umflossen werden [38]. Das an der Ortsbrust gelöste Material wird zum größten Teil in bohrlochnahe Bereiche umgelagert, dadurch kommt es in diesen Zonen zu einer Verfestigung. Der nicht verdrängbare Anteil an gelöstem Material wird über die rückfließende Spülung aus dem Bohrloch ausgebracht [8]. Zum Einsatz kommt dieses Verfahren in feinkörnigen Böden der Klassen 1 - 5, die kein nennenswertes Steingerüst aufweisen [15]. Der Druck mit dem die Spülung aus den Düsen austritt, wird durch die Anzahl der Düsen im Meißel, deren Durchmesser sowie der zur Anwendung kommenden Maschinentchnik bestimmt. Der Druck, der zum Abbau der unterschiedlichen Formationen notwendig ist, ergibt sich aus dem Abstand der Düsen von der Ortsbrust, den Eigenschaften der jeweiligen Formation sowie dem Volumenstrom, mit dem die Spülung eingebracht wird. Zu hohe Spülungsdrücke bedingen eine Rissentstehung in der Formation. Dies kann zu unerwünschten Spülsaustritten führen [38].

Die zum Einsatz kommenden Abbauwerkzeuge werden als Spüllanzen bezeichnet. Diese zylinderförmigen Meißel verrichten ihre Lösearbeit erodierend unter der teilweisen Zuhilfenahme von mechanischer Arbeit [38].

2.1.2 Dreh-schlagendes und schlag-drehendes Bohren

Das dreh-schlagende oder schlag-drehende Bohren setzt sich aus einer Kombination von spanendem und schlagendem Bohren zusammen. Durch eine Überlagerung eines hohen Anpressdrucks mit Schlagimpulsen kommt es zu einer Steigerung der Eindringwirkung in das Gestein [20]. Beim dreh-schlagenden Bohren findet eine kontinuierliche Rotation des Bohrstranges statt. Die großen Drehmomente bedingen gemeinsam mit dem hohen Anpressdruck, dass während des Umsetzens des Bohrmeißels Lösearbeit durch Abscheren stattfindet [51]. Das Verhältnis zwischen Schlag- und Drehimpuls gibt vor, ob es sich um dreh-schlagendes oder schlag-drehendes Bohren handelt.

Das Verfahren des dreh-schlag Bohrens basiert auf der Kombination der folgenden vier Aktionen:

- Schlagen: Der Kolben innerhalb des Bohrhammers schlägt auf das hintere Ende des Bohrstranges (Außenhammer) oder direkt auf den Meißel (Imlochhammer) und erzeugt dadurch Stoßwellen, die auf den Meißel übertragen werden.
- Rotation: Durch einen Rotationsmechanismus wird der Bohrstrang stetig gedreht, dadurch wird die Schlagenergie immer auf andere Punkte der Bohrlochsohle geleitet.
- Vorschub- oder Anpressdruck: Dieser ist erforderlich, um den ständigen Kontakt des Meißels mit dem Gestein sicher zustellen. Dadurch ist es möglich, die maximale Schlagenergie zur Gesteinszerstörung zu nutzen.
- Spülen: Die Spülung wird verwendet, um die erbohrten Cuttings aus dem Bohrloch abzutransportieren. Des Weiteren hat die Spülung die Aufgabe den Bohrmeißel zu kühlen. Als Spülmedium können sowohl Wasser oder Luft, als auch Schaum verwendet werden. Das Spülmedium wird durch das hohle Bohrgestänge und durch den Meißel in das Bohrloch tiefste geleitet [98].

Die Art der Gesteinszerstörung bei drehend-schlagenden Bohrverfahren ist in Abbildung 2.15 dargestellt. Bei dieser können vier Mechanismen unterschieden werden.

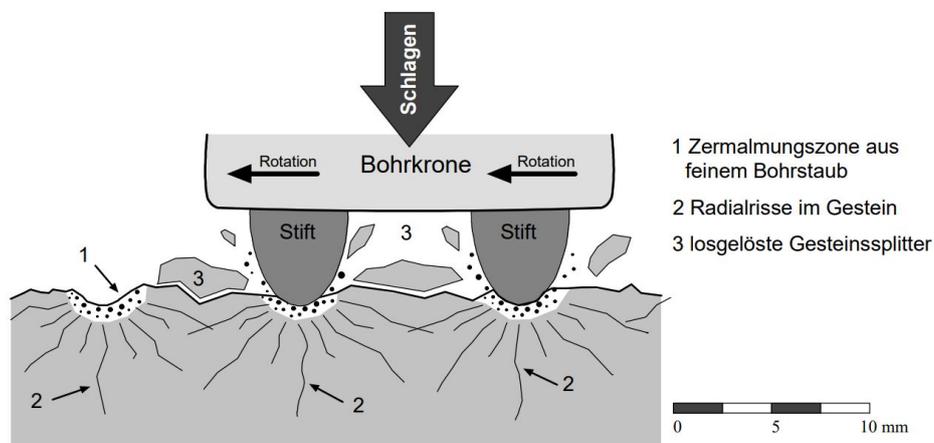


Abb. 2.15: Dreh-schlagende Gesteinszerstörung [88]

1. Unter dem Bohrstift bildet sich durch den Schlag eine zerdrückte Zone aus feinem Gesteinspulver aus (Zermahlungszone).
2. Von der gebrochenen pulverisierten Zone ausgehend entstehen durch die induzierten Zugspannungen neue radiale Risse.
3. Wenn die Spannung im Gestein hoch genug ist (sobald genug Risse parallel zur Ortsbrust vorhanden sind), können größere Gesteinschips zwischen den Meißelstiften abgeschert werden. (Schubspannungen)
4. Zusätzlich zu den genannten Mechanismen werden durch die dynamische Beanspruchung periodisch Spannungen eingebracht.

Bei diesem Bohrprozess ist es offensichtlich, dass neben der Druck- und Zugfestigkeit, die durch die schlagende Beanspruchung überwunden wird, der Scherfestigkeit, die durch die Rotation des Bohrstrangs überwunden wird, die elastischen Eigenschaften des Gesteins von entscheidender Bedeutung sind. Da der Meißel immer durch vorgebrochenes Gestein bohrt, wurde die spezifische Zerstörungsarbeit eingeführt. Diese ist ein Maß für die Energiemenge, die zur Zerstörung einer Gesteinsprobe notwendig ist [89].

2.1.2.1 Hammerbohrung

Die mechanische Wirkungsweise dieser Verfahren ist schlagend (kerbend), drehschlagend (zerspanend /kerbend) und drehend (zerspanend) [18].

Bei der kerbenden Gesteinszerstörung handelt es sich um einen Vorgang, der dem Grundbruch in der Bodenmechanik sehr ähnlich ist. In Abbildung 2.16 ist diese Form der Gesteinszerstörung ersichtlich. Durch den Eintrag lokaler Druckspannungen mit hoher Energiedichte (Hammerschläge) (1) wird im Gestein ein Spannungsfeld erzeugt. Daraus resultiert eine lokale Rissbildung (3), welche in weiterer Folge zum Herausplatzen von benachbarten Gesteinssplittern führt. Die Eindringtiefe des Bohrwerkzeugs sowie die Menge des gelösten Gesteins hängen von verschiedenen

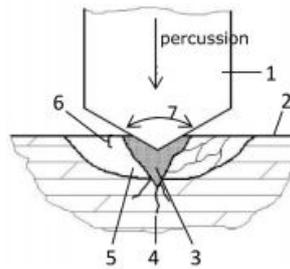


Abb. 2.16: Kerbende Gesteinszerstörung [58]

Parametern wie etwa der Gesteinsfestigkeit, dem Energieeintrag und der Kontaktfläche ab. Beim Kerben erfolgt die Krafteinleitung entweder schleifend, rollend oder schlagend [59].

Bei der spanenden Gesteinszerstörung erfolgt ein Abscheren des Gesteins vor dem Meißel. Eine genauere Beschreibung dieses Vorgangs ist in Kapitel 2.1.1.5 zu finden.

Bei der Hammerbohrung wird die vom Bohrhämmer erzeugte Energie abhängig davon, ob es sich um einen Imlochhammer oder einen Außenhammer handelt, direkt zur Bohrkronen oder über das Bohrgestänge zur Bohrkronen geleitet, wo diese zur Zerstörung des Gesteins genutzt wird. Der wichtigste Bestandteil jedes Bohrhammers ist der Kolben. Dieser wird je nach Verfahren durch einen Luft- oder Hydraulikstrom beschleunigt und leitet die Schlagenergie verfahrensabhängig direkt in den Meißel oder über das Bohrgestänge in den Meißel weiter [18]. Wird ein Außenhammer eingesetzt, so wird die Schlagenergie des Kolbens mittels einer Stoßwelle über das Bohrgestänge zum Meißel geleitet. Besitzen der Kolben und das Gestänge den selben Querschnitt, so wird das Gestänge auf einer Länge, welche in etwa der doppelten Kolbenlänge entspricht, zusammengedrückt. Dadurch kommt es zu einer Vergrößerung des Querschnitts. Die vom Kolben erzeugte Stoßwelle bewegt sich mit Schallgeschwindigkeit durch den Stahl (Schallgeschwindigkeit im Stahl ca. 5000 m/s) [18].

Hammerbohrungen können folgendermaßen unterschieden werden:

- Außenhammer mit Luftantrieb,
- Außenhammer mit Hydraulikantrieb,
- Imlochhammer mit Luftantrieb sowie
- Imlochhammer mit Wasserantrieb (Wassarahammer) [18].

In Abbildung 2.17 ist die Funktionsweise von luftbetriebenen Imlochhämmer dargestellt.

1. Der Kolben liegt auf dem Bohrmeißel auf und der Hammer befindet sich in der Bohrposition. Zum Start des Bohrzyklus wird Druckluft auf die Schlagfläche des Kolbens geleitet und der Kolben wird dadurch angehoben.
2. Wenn sich der Kolben nach oben bewegt, bedeckt er die obere Auslasskammer. Eine weitere Bewegung des Kolbens überdeckt den stromzuführenden Luftanschluss an der Unterseite des Kolbens und legt das Fußventil frei. Dadurch kann die expandierende Luft durch den Einsatz entweichen. Zur gleichen Zeit wird Druckluft aus der Vorratskammer über den Kolben geleitet. Damit beginnt der Arbeitshub.

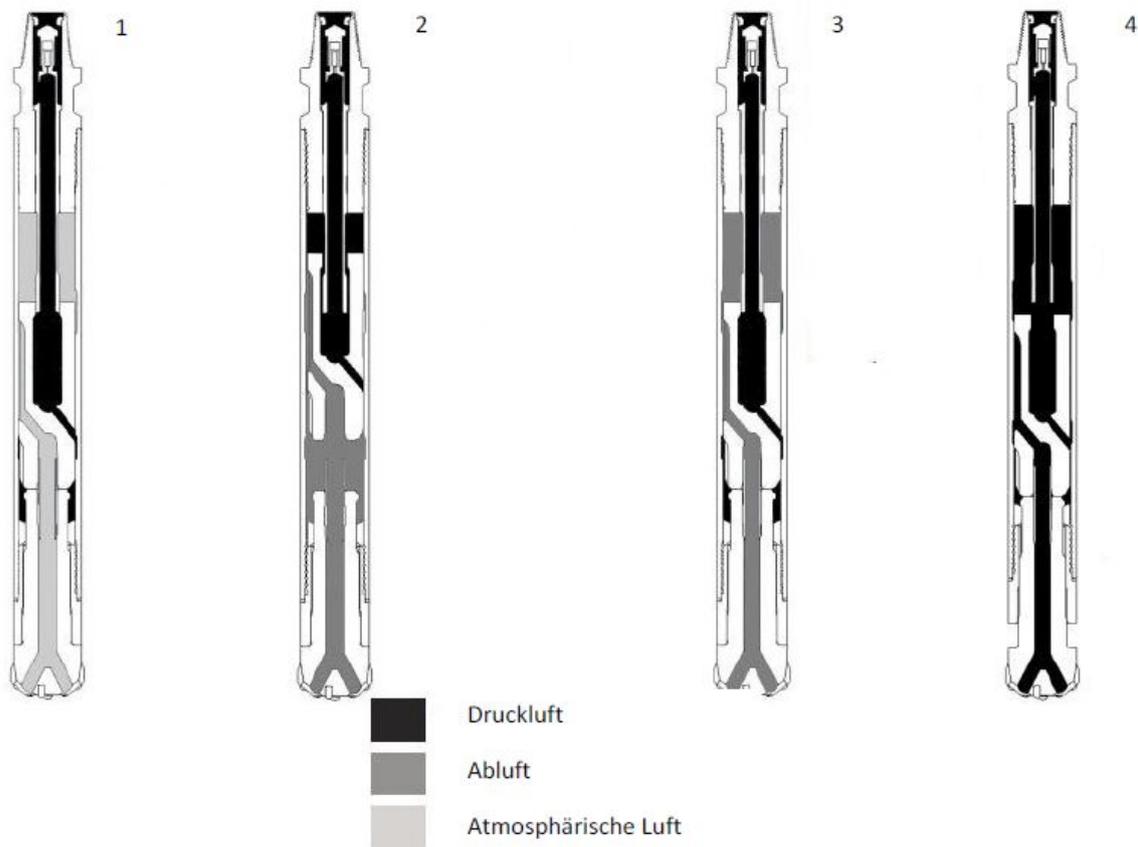


Abb. 2.17: Abläufe bei Imlochhammerbohren mit Luft aus: [46]

3. Während des Arbeitshubs bedeckt der Kolben das Fußventil, und die sich unter dem Kolben ausdehnende Luft hört auf, durch den Meißel zu strömen. Eine weitere Kolbenbewegung trennt die Kolbenvorratskammer von der Kraftkammer. Wenn der Kolben auf dem Meißel aufliegt und der Hammer in der Bohrposition ist, wird Hochdruckluft auf die Kolbenschlagfläche gerichtet und hebt den Kolben an.
4. Wenn sich der Hammer von der Unterseite des Lochs abhebt, fällt der Meißel auf die Halteringe. Der Kolben folgt dem Meißel. Hochdruckluft wird im Anschluss durch die Bohrkronen über die Hauptauslasslöcher in dem Kolben und durch die Bodenkammer geleitet, die normalerweise den Kolben für den Rückhub versorgt. Der Hammer befindet sich jetzt in der maximalen Spülposition. Um das Bohren fortzusetzen, wird der Hammer wieder auf den Boden des Lochs abgesenkt. Dies führt dazu, dass der Meißel und der Kolben in die normale Bohrposition hochgedrückt werden. Der Hammerzyklus wird automatisch fortgesetzt [46].

Außenhämmer

Hierbei handelt es sich um Bohrhämmer, die an der Lafette des Bohrgeräts und somit an der Spitze des Bohrstrangs angeordnet sind. Außenhämmer werden an einer Bohrlafette geführt und haben aus diesem Grund den Vorteil, dass ihre Arbeitsweise ständig vom Bohrmeister überwacht werden kann. Die notwendige Rotationsenergie zur Drehung des Bohrstrangs wird

durch ein Drehteil erzeugt, an welchem das Gestänge montiert ist. Mit einem solchen Bohrsystem ist es möglich, Bohrungen mit Längen zwischen 70 und 80 m abzuteufen. Die relativ geringe Bohrtiefe resultiert aus dem Umstand, dass die Schlagenergie über den Bohrstranges bis zum Bohrmeißel geführt werden muss [18]. Durch diese Übertragung über den Bohrstranges geht an jeder Muffenverbindung des Innengestänges ein gewisser Anteil der Schlagenergie verloren, da diese durch die Querschnittsänderung reflektiert und in Wärme umgewandelt wird [17].

- **Luftbetriebene Außenhämmer:** Luftbetriebene Außenhämmer arbeiten mit einer Drehgeschwindigkeit zwischen 500 – 1500 U/min. Der Bohrhammer wird mit Hilfe von Druckluft betrieben, welche mit externen Kompressoren erzeugt wird (ca. 10 bar) [8]. Eine nachteilige Eigenschaft dieses Systems ist, dass es bei nassem und kaltem Wetter oft zu Vereisungen der Bohrröhre kommt. Dies ist bedingt durch die Expansion der Druckluft, welche vom Außenhammer durch das Bohrgestänge zum Meißel transportiert wird, und dort als Bohrspülung wirkt. Weitere Nachteile sind die große Lärm- und Staubbelastung, die mit der Anwendung dieses Systems verbunden sind [18]. Vertikale sowie ausgerichtete Bohrungen sind nur sehr schwer herzustellen [17]. Der Umsetzungsvorgang von Bohrhämmern erfolgt entweder schlagend oder dreh-schlagend. Beim Umsetzen erfolgt nach jedem Schlag eine kleine Drehung des Bohrgestänges. Auf diese Art werden immer andere Bereiche der Bohrlochsohle beansprucht und es können die besten Ergebnisse erzielt werden [2].
- **Hydraulisch betriebene Außenhämmer:** Diese Hämmer lassen sich aufgrund ihrer Arbeitsweise mit veränderlichem Kolbenhub gut an die geologischen Verhältnisse anpassen. Dies ist durch die Arbeitsweise mit selbstregelnden Koaxialpumpen, welche den Öldruck und das Ölvolumen automatisch an die anstehenden Bedingungen anpassen, möglich [18].

Imlochhämmer

Imlochhämmer, auch Down The Hole Hammer (DTH-Hammer) genannt, unterscheiden sich von Außenhämmern dahingehend, dass der Bohrhammer im Bohrlochtiefsten angeordnet ist. Dadurch können die Verluste der Schlagenergie eliminiert werden, die bei Außenhammerbohrungen im Bohrstrang auftreten [18]. Die für die drehend-drückende Gesteinszerstörung notwendige Rotationsenergie wird wie bei Außenhammerbohrungen mit Hilfe von Kraftdrehköpfen, die an der Bohrlafette angeordnet sind, erzeugt und über das Gestänge zum Bohrhammer geleitet [54]. Mit wasserbetriebenen Imlochhämmern wurden Bohrungen bereits in 190 m Tiefe niedergebracht [52].

- **Luftbetriebene Imlochhämmer:** Bei diesem Bohrverfahren wird die Bohrung aus einer Kombination aus Drehen und Schlagen abgeteuft. Die wichtigsten Bauteile des Imlochhammers sind der Hammer mit dem Schlagkolben, der die Schlagenergie an den Meißel, welcher direkt mit dem Hammer verbunden ist, weitergibt, das Einsteckende und der Stiftbohrmeißel selbst [54].

Die zum Antrieb des Hammers notwendige Druckluft wird über das Innengestänge zu diesem geführt. Zusätzlich zum Antrieb des Bohrhammers erfüllt die Druckluft die Funktion der Kühlung des Bohrwerkzeuges sowie den Abtransport des Bohrkleins [18]. Bei diesem Verfahren ist die Bohrgeschwindigkeit beinahe unabhängig von der Bohrlochtiefe, da der Bohrlochhammer direkt hinter dem Meißel situiert ist und dadurch keine Energie mehr durch den Transport über die Verrohrung verloren geht. Derartige System arbeiten mit Drücken zwischen 5 – 18 bar. Eine Steigerung des Betriebsdrucks führt zu einer Steigerung des Bohrfortschritts und in weiterer Folge auch zu einer Verlängerung der Standzeit der Bohrwerkzeuge, da durch den größeren Druck das Bohrloch besser gespült wird. Dieses System kann sowohl für verrohrte als auch für unverrohrte Bohrungen herangezogen werden [18].

- Imlochhammer mit Wasserantrieb (Wassara Bohrhammer): Die Schwedische Firma *Wassara AB* entwickelte ein System, das einen Imlochhammer nur durch Wasser antreibt [18]. Das Grundprinzip dieses Bohrhammers beruht auf der Umwandlung von hydraulischer Energie in Druckkräfte, mit Hilfe derer der Hammer betrieben wird. Die Bohrspülung wird kontinuierlich durch das Innengestänge zum Bohrhammer geleitet, treibt diesen an und dient in weiterer Folge auch als Bohrspülung. Um das Eindringen von Bergwasser in die Bohrung zu vermeiden, muss der Wasserdruck immer höher sein als der die Bohrung umgebende Bergwasserdruck. Der Druck darf jedoch nicht so hoch sein, dass es zu einem zusätzlichen Auswaschen des die Bohrung umgebenden Gebirges kommt [71]. Vor allem in sehr harten und abrasiven Gesteinen ist dieses System sehr gut geeignet [18].

Durch die Inkompressibilität von Wasser kommt es beim Transport des Wassers praktisch zu keinen Druckverlusten. Dadurch ist die Bohrleistung des Hammers auch vollkommen unabhängig von der Tiefe des Bohrlochs. Im Vergleich zu Luft ist es auch möglich viel größere Drücke zu erzeugen. Mit Luft liegen die erzeugbaren Drücke bei 30 bar, während mit Wasser Drücke bis zu 180 bar möglich sind. Diese Druckunterschiede spiegeln sich in der Schlagenergie der Bohrhämmer wieder, so führt ein Wassara Bohrhammer 3600 Schläge pro Minute aus, während die Schlagenergie eines luftbetriebenen Hammers bei ca. 20% dessen, bei 700 Schlägen pro Minute liegt [14]. Abhängig von den Eigenschaften des anstehenden Gebirges, sind mit dieser Bohrmethode Bohrgeschwindigkeiten von bis zu 1,0 m/min möglich. Um den notwendigen Wasserdruck, der für den Betrieb dieses Systems notwendig ist, erzeugen zu können, sind zusätzlich zum Bohrgerät noch sehr leistungsstarke Spülpumpen notwendig, die die benötigte Leistung von 100 bis 500 l/min bei einem Betriebsdruck zwischen 150 bis 180 bar erreichen [18]. Durch den Einsatz dieses Bohrsystems lassen sich Bohrungen mit sehr großen Tiefen – bis zu 200m – mit gleichzeitig sehr geringen Richtungsabweichungen im Bereich von 1 -2 % abteufen. Hierbei ist jedoch zu erwähnen, dass es sich bei derartigen Bohrungen um unverrohrte Bohrungen handelt, die unter Zuhilfenahme von Stabilisatoren niedergebracht wurden [14].

2.1.3 Schlagendes Bohren

Bei dieser Methode werden durch Schlagimpulse, die auf das Bohrwerkzeug übertragen werden, Kerben im anstehenden Gestein verursacht. Durch die Überwindung der Druckfestigkeit des Gesteins splittert dieses aus seinem Verband [55]. Das Material wird also drückend/zertrümmernd aus dem Verband gelöst. Der Bohrprozess ist in Abbildung 2.18 dargestellt und lässt sich in vier Schritte unterteilen:

1. Belastungsbeginn: Durch die Steigerung des Anpressdrucks nimmt die Druckspannung innerhalb des Gesteins, welches in Kontakt mit dem Schneidelement steht, zu.
2. Ausbildung eines Keils: Nach der Überschreitung der Druckfestigkeit des Gesteins bildet sich unterhalb der Schneide ein Keil aus feinstgebrochenen Gesteinspartikeln aus.
3. Kraterförmiges Brechen: Unter einer weiteren Steigerung der Druckbelastung wird der Keil dermaßen zusammengedrückt, dass die im Gestein vorherrschenden Schubspannungen die Scherfestigkeit des Keils überschreiten. Dadurch kommt es zur Ausbildung einer kraterförmigen Risszone.
4. Nach der Kraterbildung löst sich das Gestein entlang der Risse [92].

Bei diesem Verfahren findet nach jedem Schlag ein ruckartiges Umsetzen des Bohrmeißels statt [51].

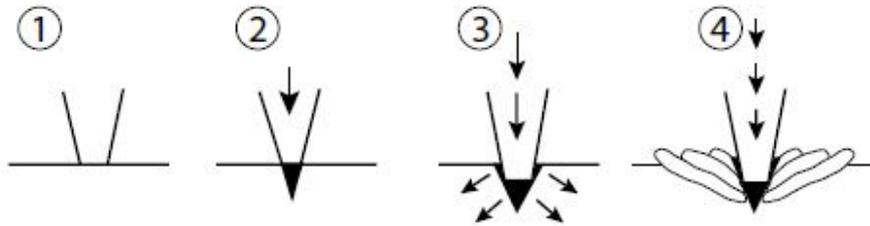


Abb. 2.18: Gesteinslösung beim schlagenden Bohren [4]

Beim schlagenden Bohren kommen die selben Bohrmethoden zum Einsatz wie beim dreh-schlagenden Bohren, diese wurden in Kapitel 2.1.2.1 beschrieben. Der Unterschied, dieser Verfahren ist lediglich die stetige Rotation des Bohrstrangs beim dreh-schlagenden Bohren [18].

2.2 Bohrlochspülung

Alle Flüssigkeiten und Gase, die während des Abteufens einer Bohrung im Bohrloch zirkulieren und zusätzlich noch einige andere Aufgaben haben, werden als Bohrerspülung bezeichnet. Abhängig von den geologischen und bohrtechnischen Verhältnissen können Bohrerspülungen als Suspension, Emulsion oder auch als reine Gasspülung verwendet werden.

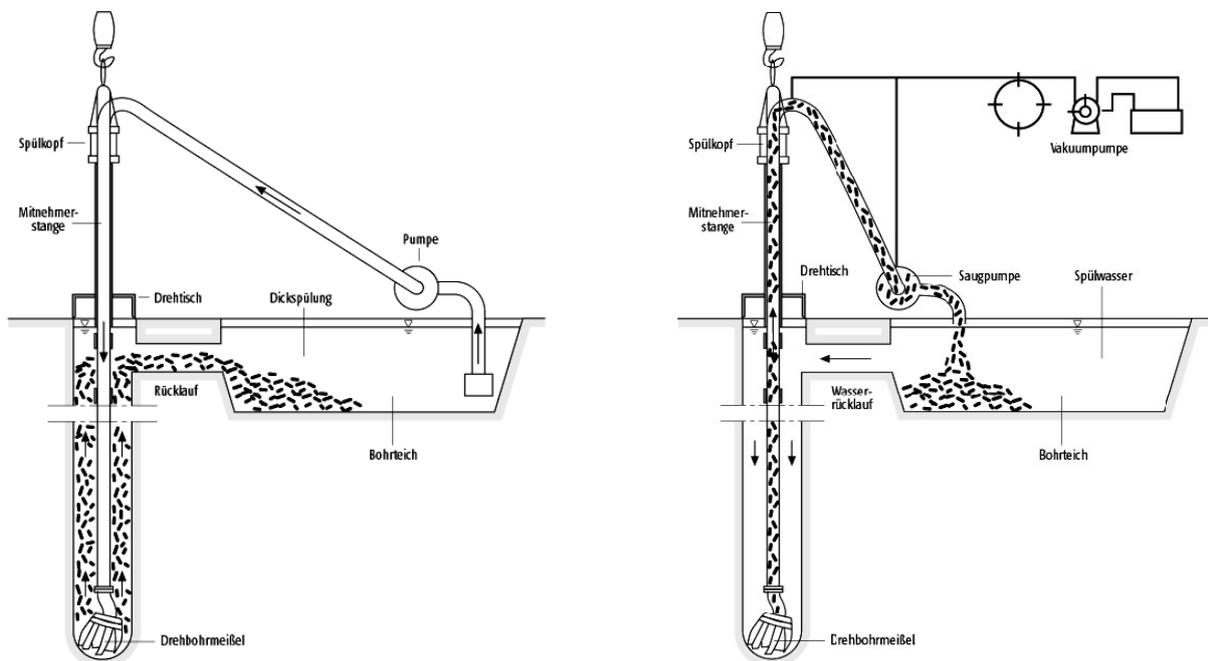


Abb. 2.19: direktes Spülbohrverfahren (links [40]) und indirektes Spülbohrverfahren (rechts [41])

Des Weiteren wird zwischen direkter und indirekter Bohrerspülung unterschieden. Beim direkten Spülungskreislauf wird das Spülungsmedium durch den Bohrstrang an die Bohrlochsohle befördert und transportiert den dort angefallenen Bohrschmand über den Ringraum das heißt zwischen

Bohrlochwand und Bohrgestänge zum Bohrlochmund. Beim indirekten Spülbohrverfahren wird wie in Abbildung 2.19 zu erkennen ist die Spülung von einer Grube oder einem Tank aus in den Ringraum gepumpt und durch das Bohrgestänge zum Bohrlochmund gefördert [20].

2.2.1 Aufgaben der Bohrspülung

Folgende Aufgaben werden an eine wirkungsvolle Bohrspülung gestellt:

- Hydraulische Lösearbeit des Gesteins und Reinigung der Ortsbrust,
- Kühlung des Bohrmeißels und Schmierung des Bohrstrangs,
- Transport des anfallenden Bohrkleins zum Bohrlochmund,
- Stabilisierung des Bohrlochs bzw.
- Antrieb von MUD-Motoren [38]

2.2.1.1 Hydraulische Lösearbeit des Gesteins und Reinigung der Ortsbrust

Die mit dem Bohrwerkzeug maximal mögliche Bohrgeschwindigkeit kann nur dann erreicht werden, wenn die an der Ortsbrust gelösten Gesteinsteile sofort zum Bohrlochmund gefördert und nicht weiter zerkleinert werden [2]. Abhängig von der Beschaffenheit des anstehenden Untergrunds ergibt sich die Art der Zerstörung der Formation. In Lockerböden geschieht dies durch hydromechanische Lösearbeit. Hierfür wird die Spülung mit Drücken zwischen 10 und 350 bar an die Ortsbrust geleitet. Dort dringt sie durch die hohe kinetische Energie in die Poren des Untergrundes ein, umschließt einzelne Partikel und löst diese aus dem Verband. Im Festgestein ist eine reine hydromechanische Lösung des Gesteins nicht möglich. Daher kommen Bohrmeißel zum Einsatz [81]. Der horizontal auf die Bohrlochsohle gerichtete Spülstrom dringt unter die bereits aus dem Verband gelösten, jedoch noch fest in der Sohle eingebetteten Teilchen, ein und hebt diese an. Dadurch wirkt nicht mehr der einseitige hydrostatische Druck der Spülungssäule, sondern das Teilchen wird allseits vom Spülungsmedium umgeben. Um ein Eindringen der Spülung in die durch das Bohrwerkzeug geschaffenen Haarrisse zu ermöglichen, müssen gewisse Anforderungen wie etwa eine möglichst geringe Viskosität sowie eine hohe Fließgeschwindigkeit an die Bohrlochspülung gestellt werden. Die Viskosität muss möglichst gering sein, um ein leichtes Eindringen in die Haarrisse zu ermöglichen. Die hohe Fließgeschwindigkeit der Spülung wird durch das Austreten der Spülung durch Düsen erreicht [20]. Mit Düsenmeißeln ist es ab einer Geschwindigkeit des Düsenstrahls von 120 m/s möglich, die Sohle fast vollständig durch die Spülung zu reinigen. Durch höhere Spülungsgeschwindigkeiten kann dieser Effekt noch weiter verbessert werden [2].

2.2.1.2 Schmieren des Bohrstrangs und Kühlung des Bohrmeißels

Die in den meisten Bohrspülungen enthaltenen Tonteilchen sind von Hydrathüllen umgeben [81]. Diese wirken als Schmiermittel des Bohrstrangs, da sie aufgrund ihrer negativen Ladung durch die elektrostatischen Kräfte an der Oberfläche des Bohrstrangs abgelagert werden. Durch diesen Schmiereffekt wird die Reibung zwischen Bohrstrang und Bohrloch reduziert. Bei älteren Rollenmeißeln übernahm die Spülung auch die Funktion der Schmierung der Meißellager, aufgrund abrasiver Bestandteile in der Spülung konnte dies zu einem vorzeitigen Verschleiß des Bohrwerkzeugs führen. Aus diesem Grund werden heute nur noch abgedichtete Lager bei Rollenmeißeln eingesetzt [38]. Eine weitere Funktion, die der Spülung zukommt, ist die Kühlung des Bohrwerkzeugs. Dies ist vor allem bei Diamantwerkzeugen sehr wichtig, da derartige Werkzeuge auf zu

hohe Temperaturen sehr sensibel reagieren und sich die Diamanten im schlimmsten Fall wieder zu Graphit umwandeln [47].

2.2.1.3 Transport des Bohrkleins zum Bohrlochmund

Der Reinigung des Bohrlochs kommt eine sehr große Bedeutung zu. Aufgrund der kurzen Sedimentationswege bei horizontalen Bohrungen besteht die Gefahr, dass sich Cuttingbeds bilden, da die Gravitation in Abhängigkeit von der Viskosität der Spülung, der Masse der Teilchen und der Strömungsgeschwindigkeit zum Absinken der Teilchen führt. Die Strömung, die während des Bohrvorgangs im Bohrloch vorherrscht, verhindert ein Absetzen der Teilchen. Bei einem Stillstand der Pumpe kommt es jedoch zu einer Sedimentation der Cuttings. Durch eine turbulente Strömung, die durch eine hohe Spülungsgeschwindigkeit in Kombination mit einer erhöhten Strangrotation herbeigeführt werden kann, ist es möglich, die Teilchen wieder in die Suspension zu bringen [81]. Zur Verhinderung der Entstehung von Cuttingbeds gibt es folgende Möglichkeit:

Es soll ein laminarer Stopfenfluss einer hochviskosen Spülung angestrebt werden. Der Bohrkleinaustrag wird durch das gleichförmige Geschwindigkeitsprofil einer Spülung mit ausreichender Gelstärke gewährleistet. Im Vergleich zu einer gewöhnlichen laminaren Strömung wird beim Stopfenfluss kein Schergefälle durch die unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten hervorgerufen. Durch den laminaren Stopfenfluss kann dem Bestreben der Cuttings zu sedimentieren entgegengewirkt werden. Ein weiterer positiver Einfluss ist, dass die Erosion der bohrlochnahen Bereiche minimiert wird [38].

2.2.1.4 Stabilisierung des Bohrlochs

In locker gelagerten, nicht bindigen Böden ist die Bohrlochwand in den meisten Fällen sehr instabil. Dies führt oft zu Auskesselungen und Nachbrüchigkeiten während des Bohrprozesses. Klüfte und diagonal verlaufende Schichtungen des Gebirges schwächen die bohrlochnahen Bereiche ebenfalls. Darüber hinaus haben Formationen mit einem hohen Anteil an quellfähigen Tonmineralien negative Einflüsse auf die Stabilität von Bohrlöchern. Die Bohrspülung hat in derartigen Formationen die Aufgabe die Bohrlöcher durch die Ausbildung eines Filterkuchens zu stützen und gegebenenfalls auch vor dem Eindringen von Grundwasser zu schützen. Die dichtesten Filterkuchen entstehen durch die Verwendung von Partikeln mit einer weit gestreuten Kornverteilung [38]. Die Bohrlochwand wird durch den Filterkuchen verstärkt und verdichtet. Bei der Entstehung von Filterkuchen lagern sich Tonminerale in einer dünnen Schicht, durch einen Filtrationsprozess übereinander ab [81].

2.2.1.5 Antrieb von MUD-Motoren

Bei verlaufsgesteuerten Bohrungen in felsigen Formationen reicht die hydraulische Energie nicht mehr zum Abbau des Gesteins aus, daher kommen in vielen Fällen MUD-Motoren zum Einsatz. MUD-Motoren werden durch den Spülstrom angetrieben. Hierfür ist ein ausreichender Druck und Volumenstrom der Spülung notwendig. An die Viskosität und den Feststoffgehalt der Spülung werden gewisse Anforderungen gestellt, um sie zum Betrieb eines MUD-Motors verwenden zu können. Vor allem abrasive Bestandteile können die Lebensdauer von MUD-Motoren verkürzen [38]. Eine detaillierte Beschreibung von MUD-Motoren ist in Teil 2 Abschnitt 2.4 zu finden.

2.2.2 Aufbau von Bohrspülungen

Bohrspülungen können sehr unterschiedlich aufgebaut sein. Das Basismedium der meisten Spülungen ist Wasser. Oft sind Spülungen als Klarwasserspülungen ohne stützende Wirkung oder durch die Zugabe von Bentonit, speziellen Polymeren oder anderen Zusatzstoffen, die Spülungen etwa stützende Eigenschaften verleihen ausgebildet. Die unterschiedlichen Komponenten, die zum Aufbau von Spülungen zum Einsatz kommen sind im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

2.2.2.1 Wasser

Wasser ist der wichtigste Spülungsgrundstoff und kommt in 95% der Fälle zum Einsatz. Aufgrund seiner geringen Dichte sind sehr hohe Bohrgeschwindigkeiten möglich. Wasser kann ohne Zusätze als Klarspülung oder als Grundlage für alle auf Wasser basierenden Spülungen eingesetzt werden [2]. Bei der Verwendung von Wasser ist auf seine chemischen Bestandteile zu achten. Die Härte und der Calciumgehalt des Wassers können negative Eigenschaften mit sich bringen. Ein zu hoher Calciumgehalt des Wassers beeinflusst die Quellfähigkeit von Spülungen, während ein hoher pH-Wert das Wasserbindevermögen der Spülung vermindert [81]. Durch den Zusatz von Soda (Na_2CO_3) ist es möglich Calcium- und Magnesiumionen auszufällen. Durch die Zugabe von Soda entsteht ein alkalisches Milieu, wodurch die schädlichen Einflüsse von Mikroorganismen behindert werden. Generell ist auf eine hohe Wasserqualität zu achten, der pH-Wert, sowie die Härte des Wassers müssen vor dem Anmachen der Spülung überprüft werden, um diese gegebenenfalls mit geeigneten Zusatzstoffen regulieren zu können [8].

2.2.2.2 Bentonit

Bei Bentonit handelt es sich um ein natürliches, kolloidales Tonmineral. Der Hauptbestandteil von Bentonit ist das Tonmineral Montmorillonit. Dieser Dreischichtenton ist der am häufigsten eingesetzte Zusatzstoff von Ton-Wasser-Spülungen. Natürliche Bentonite können in Natrium- und Calciumbentonite unterschieden werden. Calciumbentonite haben für den Zweck der Bohrspülung die besseren Eigenschaften, da diese unter anderem, wie in Abbildung 2.20 ersichtlich ist, höhere Quellpotentiale aufweisen [8].

Tonminerale quellen nicht indem sie in einzelne von Hydrathüllen umgebende negativ geladene Tonplättchen dispergieren, sondern sie bilden aus übereinander geschichteten Plättchen 1 bis 2 μm dicke Pakete. Diese Pakete können bei einer weiteren Aufnahme von Wasser weiter quellen. Durch die elektrostatischen Anziehungskräfte zwischen den einzelnen Tonplättchen entsteht eine kartenhausähnliche Struktur, wenn sich die Suspension im Ruhezustand befindet. Quellen die Tone weiter auf, so versteift sich diese Struktur zu einem gelartigen Körper [81]. Die Festigkeit des Gelkörpers, welche als Gelstärke bezeichnet wird, wird in Pascal [Pa] angegeben. [9] Die Entstehung derartiger Gelkörper wird als thixotrope Verfestigung bezeichnet. Dies ist eine reversible Eigenschaft, die beim Einbringen von Bewegungsenergie wieder verloren geht [22]. Zur Herstellung von Stützsuspensionen wird Bentonit mit Wasser angerührt. Im Vergleich zu nicht stützenden Flüssigkeiten besitzen stützende Flüssigkeiten eine geringe Bruchfestigkeit, die als Scherfestigkeit gemessen wird. Diese ist abhängig von der Zeit der thixotropen Verfestigung, vom Tongehalt und von der Temperatur. Die Fließgrenze der Suspension steigt mit der Quellzeit des Bentonits an. Daher ist es notwendig das Bentonit vor seinem Einsatz als Stützflüssigkeit 12 - 24 h vorquellen zu lassen. Diese Dauer kann durch eine gleichmäßige Verteilung durch den Einsatz von hochtourigen Rührgeräten verringert werden. Durch den Einsatz von Bentonitsuspensionen ist es möglich grobkörnige Böden zu stabilisieren. Die Suspension dringt hierfür in die Bohrlochwandung ein und bildet dort einen Filterkuchen aus. Dies geschieht indem die unter Überdruck stehende Suspension an der Bohrlochwand ausfiltert. Der entstandene Filterkuchen wirkt wie eine Membran

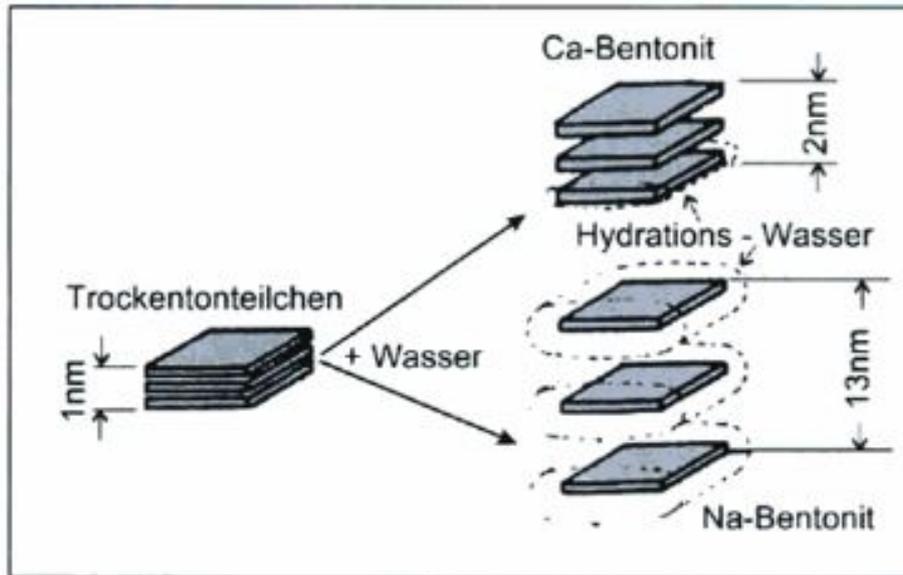


Abb. 2.20: Vergleich der Quellfähigkeit von Na-Bentonit und Ca-Bentonit [35]

und schützt das Bohrloch vor hereinfliegenden Bodenkörnern, zusätzlich dazu hat er eine das Bohrloch stützende Funktion [50].

2.2.2.3 Polymere

Die in der Spültechnik zum Einsatz kommenden Polymere bestehen aus großen Molekülen und stellen chemische Verbindungen aus Kettenmolekülen oder verzweigten Molekülen dar. Die Glieder der Kette sind sogenannte Monomere, diese können geordnet aber auch zufällig aneinander gereiht sein. Abhängig vom Aufbau und der Aneinanderreihung der Monomere ergeben sich die unterschiedlichen Eigenschaften der Polymere. In feststoffarmen oder Klarwasser-Stützflüssigkeiten werden vorwiegend Polymere mit langen Kettenverbindungen und einer hohen Viskosität eingesetzt. Zur Optimierung von Filtrations- und Fließeigenschaften von Stützflüssigkeiten, die mit Feststoffen angereichert sind, kommen hingegen Polymere mit kurzen Molekülketten und geringer Viskosität zum Einsatz [67]. In der Spülungstechnologie werden organische Polymere eingesetzt, diese lassen sich in die folgenden Gruppen einteilen:

- Biopolymere,
- Halbsynthetische Polymere und
- Vollsynthetische Polymere [8].

Biopolymere

Biopolymere sind natürlich vorkommende Verdickungsmittel, die aus Zuckermolekülen bestehen, die über lange Ketten miteinander verknüpft sind [67]. Ein Vorteil von Biopolymeren ist ihre Umweltverträglichkeit. Viele der zum Einsatz kommenden Stoffe, wie etwa Xantan Gum und Stärke, finden auch in der Lebensmittelindustrie Verwendung. Ein Nachteil dieser Polymere ist ihre Temperaturempfindlichkeit, so verlieren sie bei Temperaturen ab 90° ihre viskositätsteigernden Eigenschaften und zerfallen in Monomere, die korrosive Produkte ausbilden [8]. Aufgrund ihrer

natürlichen Entstehung kommt es sehr schnell zu einem Abbau durch mikrobiologische Prozesse, daher ist es im Allgemeinen notwendig die Stützflüssigkeiten mit Bioziden zu behandeln, um diese zu stabilisieren. Die Viskosität von Spülungen kann durch den Einsatz von Biopolymeren erhöht werden, da ihr Molekülaufbau starke Seitenverzweigungen aufweist. Das Verhalten der Viskosität ist dem von Bentonit-Spülungen sehr ähnlich, da diese bei langsamen Strömungsgeschwindigkeiten eine hohe Viskosität und Tragfähigkeit besitzen, bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten kommt es durch die Scherbelastung zu einer Reduktion der Viskosität. Aufgrund der hohen Tragfähigkeit im Ruhezustand sind zur Reinigung der Stützflüssigkeit spezielle Vorrichtungen notwendig, da diese nicht wie bei Bentonitsuspensionen in Absetzbecken sedimentieren [67].

Halbsynthetische Polymere

Der Grundstoff von halbsynthetischen Polymeren ist natürliche Cellulose, die durch eine chemische Modifizierung in verschiedene Produkte für Bohrspülungen umgewandelt werden kann. Bei Cellulose handelt es sich um die am häufigsten vorkommende organische Verbindung, da sie der Hauptbestandteil von pflanzlichen Zellwänden ist [8]. Pflanzliche Cellulose stellt den Grundstoff für Carboxymethylcellulosen (CMC) und Polyanionische Cellulosen (PAC) dar. Diese sind so aufgebaut, dass Glukosemoleküle an Carboxymethylgruppen angelagert sind und über Sauerstoffatome verknüpft werden. CMC- und PAC-Polymere unterscheiden sich lediglich durch den Anteil ihrer Wirksubstanz, diese ist bei PAC-Polymeren mit über 90% höher als die von CMC-Polymeren mit 60 - 70%. Abhängig von der Länge der Molekülketten haben CMC- und PAC-Polymere gering bis hochviskose Eigenschaften.

In Bohrlochspülungen gibt es unterschiedliche Anwendungen für halbsynthetische Polymere, so können sie etwa die Filterstabilität verbessern. Dadurch entstehen beim Durchbohren von durchlässigen Bodenschichten dünne Filterkuchen, die das Bohrloch abdichten. Kommen CMC- oder PAC-Polymere mit hydratationsaktiven Gesteinen in Kontakt, verhindern die Polymere den natürlichen Quellprozess. CMC-Stützflüssigkeiten besitzen im Vergleich zu Bentonit- und Biopolymerstützflüssigkeiten keine Fließgrenze. Dies ermöglicht eine einfache Separation der erbohrten Cuttings in einem Absetzbecken. Durch die Zugabe von kurzkettigen und damit niedrigviskosen CMC- und PAC-Polymeren zu tonlastigen, schwer pumpbaren, Stützflüssigkeiten wird die Absetzbarkeit der Cuttings gefördert, da die zugegebenen Polymere verflüssigend wirken [67].

Vollsynthetische Polymere

Vollsynthetische Polymere nutzen keine natürlichen Ausgangsstoffe, bei dieser Gruppe handelt es sich um künstliche Produkte aus der Chemieindustrie [8]. Das Ausgangsmaterial für Polymere auf der Basis von Polyacrylamid und Natriumpolyacrylamid ist Propylen. Propylen entsteht bei der thermischen Spaltung von Erdöl. Daraus werden langkettige, schlanke Polymere gewonnen, die zusammen mit Acrylsäuren gut in Wasser löslich sind. Diese Polymere haben sehr gute toninhibierende Eigenschaften und zusätzlich dazu lässt sich durch ihren Einsatz die Viskosität von Bohrlochspülungen erhöhen. Ihr größter Vorteil ist ihre Stabilität gegenüber mikrobiologischen Zersetzungs Vorgängen. Dies ermöglicht eine Wiederverwendung der Spülung. Ein weiterer Vorteil ist, dass auf die Zugabe von Bioziden verzichtet werden kann [67].

2.2.2.4 Zusatzstoffe

Zusatzstoffe werden Bohrlochspülungen in geringen Dosen hinzugegeben um ihre Eigenschaften zu verbessern. So ist durch den Einsatz von Zusatzmitteln eine Erhöhung der Bohrlochstabilität sowie der Bohrlochreinigung möglich. Folgende Anforderungen werden an Additive gestellt:

- spezifische Wirksamkeit,

- keine negativen Auswirkungen auf das Gesamtsystem,
- keine negativen Einflüsse auf die Umwelt,
- Wirtschaftlichkeit sowie
- hohe Stabilität [8].

Zur Verwendung kommen folgende Zusatzstoffe:

- pH-Wert-Regulierer: Ein hoher pH-Wert hat einen positiven Einfluss auf das Quellverhalten von Tonmineralen sowie auf die Wirkungsweise anderer Zusatzstoffe. Optimale Bedingungen herrschen im alkalischen Bereich (pH-Wert >7) vor. Durch die Zugabe von Sodaasche ist es möglich, den pH-Wert zu erhöhen. Dieser sollte so eingestellt werden, dass er zwischen 8 und 10 liegt [8]. Hohe pH-Werte gewähren zusätzlich zu den positiven Einflüssen, die sie auf die Spülung haben, einen Korrosionsschutz [47].
- Strukturbildner: Hierbei handelt es sich um NA^+ -Bentonite, die die Aufgabe haben, im Wasser zu dispergieren und dadurch eine gerüstartige Struktur auszubilden. Die Wirkungsweise von Bentonit wurde bereits in Kapitel 2.2.2.2 erläutert. Die Festigkeit dieser Struktur wird als Gelstärke bezeichnet und muss messbar sein. Sowohl der Bohrkleintransport als auch das Schwebevermögen des Bohrkleins in der ruhenden Spülung wird dadurch unterstützt. Aufgrund der geringen elektrolytresistenz von Bentoniten sollten bei der Verwendung von Brack- oder Meerwasser als Spülbasis salzstabile Strukturbildner genutzt werden. Dies sind etwa Sepiolith oder auch Attapulgit [8].
- Andere Additive: Zusätzlich zu den bereits Genannten gibt es noch Zusatzmittel für folgende Zwecke:
 - Filtratsenker und Schutzkolloide,
 - Suspensionsverbesserer,
 - Toninhibierende Additive,
 - Reibungsreduzierer und Schmiermittel,
 - Benetzungsmittel,
 - Stopfmittel,
 - Beschwerungsmittel/ Inerte Feststoffe sowie
 - Verflüssiger [8].

2.2.3 Spülsaufbereitung

Durch den Einsatz von passenden Recyclinganlagen ist es möglich die während der Bohrung anfallenden Feststoffe aus der Spülung zu separieren. Dadurch kann die gereinigte Spülung in einem geschlossenen Kreislauf wieder verwertet werden. Wie in Kapitel 2.2.1.1 erwähnt, hat der Anteil an Feststoffen, die sich in der Spülung befinden einen großen Einfluss auf die Bohrgeschwindigkeit und den Werkzeug- sowie Pumpenverschleiß. Durch die Aufbereitung und die mehrmalige Verwendung der Spülung ist es möglich die Wirtschaftlichkeit der Bohrung nachhaltig, im Hinblick auf den Verbrauch von Spülsauffüllstoffen, zu erhöhen (siehe Abbildung 2.21) [77].

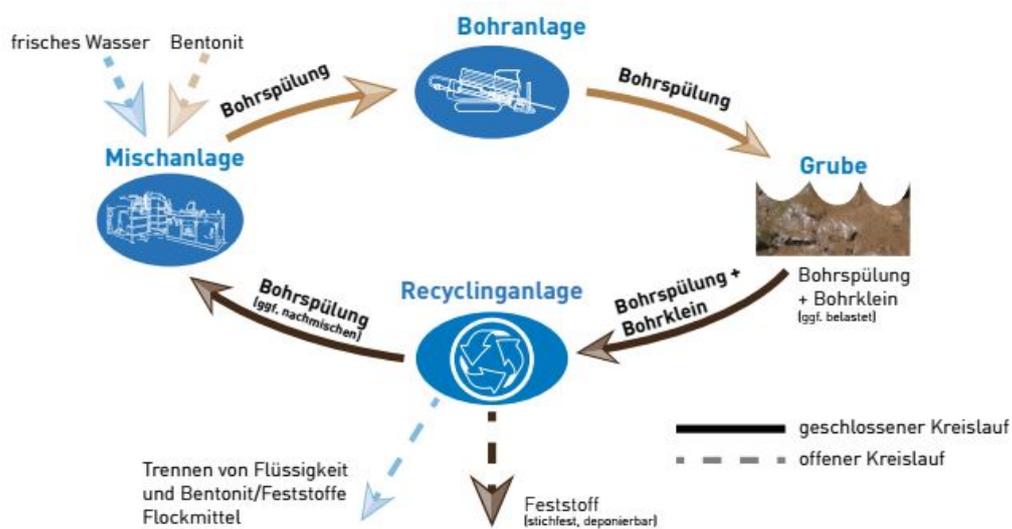


Abb. 2.21: Spülungskreislauf [77]

Abhängig von der Art und dem Anteil der Feststoffe des Bodens, in dem gebohrt wird, erfolgt die Zusammenstellung der Komponenten der Recyclinganlage [77]. Die Feststoffe werden abhängig von ihrer Größe (Abbildung 2.22) mit Hilfe folgender Komponenten aus der Spülung getrennt:

- Shaker,
- Hydrozyklone (Desander und Desilter) und
- Zentrifuge.

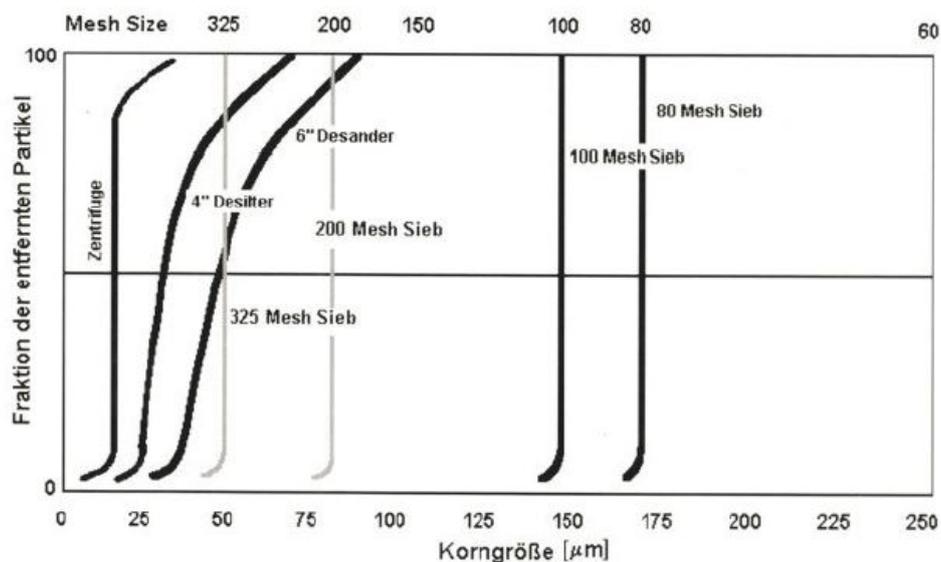


Abb. 2.22: Spülsauberungsanlagen abhängig von der Kornfraktion [20]

2.2.3.1 Shaker

Der erste Schritt bei der Entfernung von Feststoffen aus der Bohrspülung ist der Einsatz von Schüttelsieben. Diese entfernen Feststoffe aus der Bohrflüssigkeit, indem der Bohrschlamm über die Oberfläche eines Vibrationssiebs läuft. Partikel, die kleiner sind als die Öffnungen des Schüttelsiebs, fließen zusammen mit der flüssigen Phase der Spülung durch diese Öffnungen. Partikel, die zu groß sind, um durch die Öffnungen zu passen, werden aus der Spülung separiert und entsorgt. Diese Schüttelsiebe können Kornfraktionen bis zu 74 μm abscheiden [20]. Bei einer unsachgemäßen Ausführung dieses Schrittes der Feststoffabscheidung kommt es zu einer Verringerung der Effizienz der nachgeschalteten Anlagen, so würden nachfolgende Hydrozyklone über ihre Entwurfskapazität hinaus überladen werden. Die effektivsten zum Einsatz kommenden Shaker führen ihre Bewegung entweder in ausgewogenen elliptischen Bahnen oder linear aus. Grundsätzlich fungiert ein Sieb als "Go-No-Go"-Messgerät, das bedeutet, dass ein Partikel entweder klein genug ist, um durch die Öffnung im Sieb zu passen oder entsorgt wird. Siebe, die in Feststoffkontrollanlagen verwendet werden, bestehen in der Regel aus mehrschichtigem Drahtgewebe und stellen den wichtigsten Bestandteil derartiger Separationsanlagen dar [1].

2.2.3.2 Hydrozyklone

Durch den Einsatz von hintereinander geschalteten Hydrozyklonen ist es möglich, Sand und Schluff aus der Bohrspülung zu separieren. Der erste Hydrozyklon wird auch Desander genannt und besitzt einen Innendurchmesser von größer 4“ am Oberen Zylinder. Dieser beseitigt Feststoffe mit einer Größe von $>60\mu\text{m}$, während der Desilter einen inneren Durchmesser, der kleiner gleich 4“ ist, aufweist, Feststoffe mit einer Korngröße $>20\mu\text{m}$ abscheidet. Abhängig von der Einstellung der Geräte, der Viskosität und Dichte der Spülung ist es möglich, dass die Wirkungsbereiche der Geräte ineinander übergreifen. Hydrozyklone setzen sich aus folgenden drei Teilen zusammen:

Hydrozyklone arbeiten nach dem Prinzip des Absetzens, dieses folgt dem Sinkgesetz nach *Stoke*. Um die Effizienz des Absetzvorganges zu steigern, werden die Partikel, die sich absetzen sollen mit einer Beschleunigung, die ein vielfaches der Erdanziehungskraft beträgt, beaufschlagt. Die Spülung wird unter konstantem Druck und mit einer hohen Geschwindigkeit über den Einlaufstutzen, der sich im oberen zylindrischen Teil des Zyklons befindet, zugeführt. Aufgrund der hohen Geschwindigkeit und der ununterbrochenen Zufuhr neuer Spülung, ist diese gezwungen sich spiralförmig zum unteren Ende zu bewegen. Durch die Entstehung eines Primärwirbels wird die Spülung in den konischen Teil befördert. Aufgrund der konischen Form des Zyklons im unteren Teil erfährt die Spülung eine weitere Beschleunigung, durch die dadurch entstehende Fliehkraft werden große Partikel nach außen befördert, die leichteren verbleiben in der Mitte. Aufgrund der höheren Dichte der abzuschheidenden Teilchen werden diese aufgrund der Fliehkraft schneller an die Wand des Konus gepresst. Dort werden sie durch Feststoffe, die sich weiter oben ablagern ständig nach unten gedrückt. Die innere flüssige Phase des nach unten gerichteten Stroms löst sich sobald sich der Durchmesser des Konus verjüngt. Dadurch entsteht im Zentrum des Zyklons ein nach oben strömender Flüssigkeitskern, der von dem Fortex Finder, dies ist ein innenliegender Zylinder, aufgenommen und abgeleitet wird. Ein sich zwischen den beiden Öffnungen des Hydrozyklons ausgebildeter Luftkern unterstützt die Strömungsumkehr der flüssigen Phase. Bei der an der oberen Auslassöffnung abgeschiedenen Flüssigkeit handelt es sich um die Bestandteile der Spülung, die die geringste Dichte haben und deswegen von der Wirkung der Zentrifugalkraft am wenigsten beeinflusst werden [20].

Prinzip der Wirkungsweise des Hydrozyklons

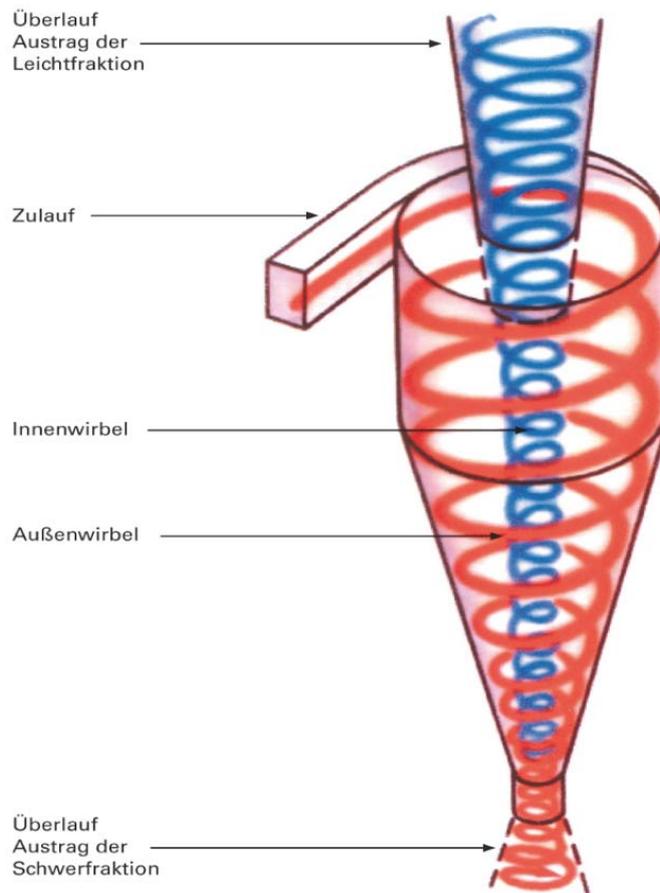


Abb. 2.23: Wirkungsweise eines Hydrozyklons [37]

2.2.3.3 Zentrifuge

Zentrifugen werden nur in Sonderfällen eingesetzt um Feinstteile, $<10\ \mu\text{m}$ abzuscheiden [38]. Zum Einsatz kommen in den meisten Fällen Gegenstrom- bzw. Durchflusszentrifugen. Das Funktionsprinzip einer derartigen Zentrifuge ist in Abbildung 2.24 dargestellt. Ein anderes Einsatzgebiet von Zentrifugen ist die Trocknung des Desander- bzw. des Desilterunterlaufs. Dadurch ist es möglich, die Deponiekosten zu reduzieren und eventuell mit Chemikalien versehene flüssige Phasen dem Spülstrom wieder zuzuführen [21]. Der wichtigste Bestandteil von Zentrifugen für das Recyclieren von Bohrspülungen ist der Schneckenlauf, dieser lässt sich in einen geraden und einen konischen Abschnitt unterteilen. Diese Förderschnecke, die sich innerhalb des Kapselgehäuses befindet und mit hoher Geschwindigkeit rotiert, wird mit der Bohrspülung beaufschlagt. Durch die Rotationsgeschwindigkeit der Schnecke entstehen Zentrifugalkräfte von bis zu 4000 g. Dies bewirkt eine trennende Ablagerung der größten Partikel an der Außenwand der Trommel. Die Schnecke transportiert die Feststoffe zum Zulauf der Wendel. Dort treten sie über einen Auslass als eingedickter Schlamm aus. Dieser Schlamm wird entsorgt, während die anfallende Flüssigkeit wieder der Bohrspülung zugeführt wird. Durch eine derartige Form des Spülungsrecyclings ist es

möglich Bohrspülungen für 20 bis 30 Spülungsumläufe pro Tag mehr zu verwenden, wenn der aufbereiteten Flüssigkeit wieder Bentonite oder Polymere zugefügt werden. Dies bedingt eine große Einsparung beim Verbrauch von Rohstoffen und erhöht dadurch die Wirtschaftlichkeit eines Bohrprojekts [8].

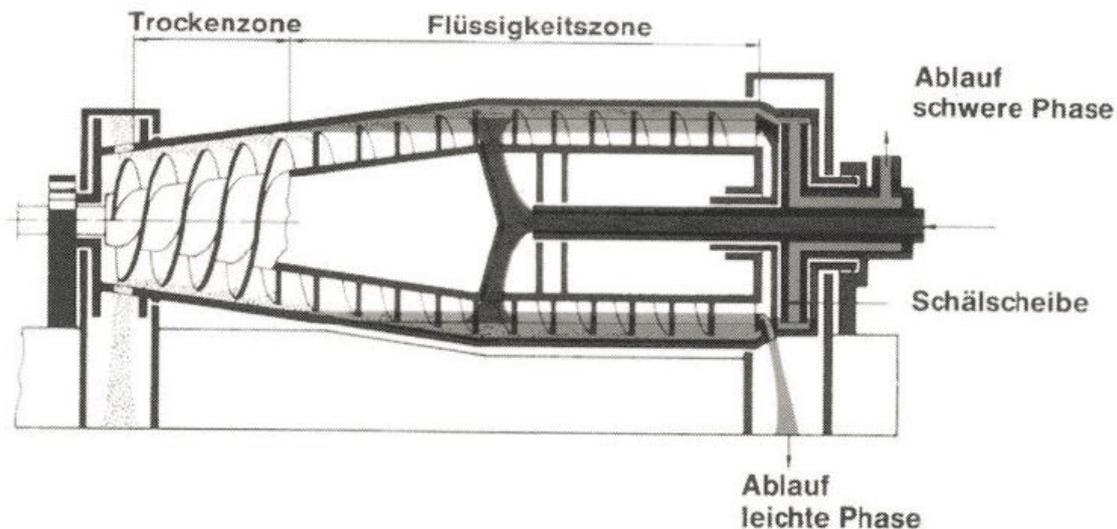


Abb. 2.24: Gegenstromzentrifuge [20]

2.3 Bohrgeschwindigkeit

Die Bohrgeschwindigkeit wird in [m/s] gemessen. Sie ist jene Bohrstrecke in Meter, die pro Minute erbohrt werden kann [34]. Allgemeine Aussagen zu den Bohrgeschwindigkeiten, die mit den einzelnen Verfahren erzielbar sind, sind nicht möglich, da die Bohrgeschwindigkeiten von verschiedenen verfahrenstechnischen und geologischen Randbedingungen abhängen.

Der Prozess der Gesteinszerstörung stellt die Grundvoraussetzung für hohe Bohrgeschwindigkeiten dar. Die kontrollierte Gesteinszerstörung bringt im Gegensatz zur Zerstörung von Festkörpern wie etwa Metallen große Schwierigkeiten mit sich. Diese sind durch die inhomogenen und anisotropen Eigenschaften der Gesteine bedingt. Aufgrund der Vielfältigkeit der Einflüsse auf die Gebirgs- und Gesteinseigenschaften ist es bis heute nicht möglich, exakte Parameter für die optimalen Bohrgeschwindigkeiten in den jeweiligen Formationen zu definieren. Aus diesem Grund wird hierfür auf Erfahrungswerte aus vergangenen Projekten zurückgegriffen [30].

Die wichtigsten Faktoren, die die Bohrgeschwindigkeit beeinflussenden sind:

- Maschinen- und Personaltechnische Faktoren,
- Formationseigenschaften,
- Mechanische Faktoren,
- Hydraulische Faktoren und
- Bohrfluideigenschaften [72].

2.3.1 Maschinen- und Personaltechnische Faktoren

Unter den maschinentechnischen Faktoren versteht man die Art des Bohrverfahrens, ob es sich um drehendes-, schlagendes- oder dreh-schlagendes Bohren handelt, die Leistung des zum Einsatz kommenden Bohrgeräts und die Art des eingesetzten Bohrwerkzeugs. All diese Faktoren müssen bestmöglich auf die anstehende Geologie, meist anhand von Erfahrungswerten, abgestimmt werden, um gute Bohrgeschwindigkeiten erzielen zu können [88]. Das zum Einsatz kommende Personal darf bei der Betrachtung der erzielbaren Bohrgeschwindigkeiten keinesfalls außer Acht gelassen werden. Eine gute Mannschaft kann die Zeiten, die zum Aufsetzen des Bohrgestänges notwendig sind, stark reduzieren [96]. Des Weiteren kann ein erfahrener Bohrmeister die Bohrparameter - wie etwa den Anpressdruck und die Rotationsgeschwindigkeit - während der Bohrung anpassen, falls Änderungen in der angetroffenen Geologie auftreten. Derartige Änderungen der Parameter bedingen eine höheren Bohrfortschritt sowie einen geringeren Verschleiß der eingesetzten Werkzeuge [57].

2.3.2 Formationseigenschaften

Die Eigenschaften der zu erbohrenden Formationen können in geologische und felsmechanische Eigenschaften unterschieden werden.

2.3.2.1 Felsmechanische Parameter

Einaxiale Druckfestigkeit

Die einaxiale Druckfestigkeit stellt einen wichtigen Wert für die Korrelation mit der Bohrgeschwindigkeit dar. Die Gründe hierfür sind, dass es möglich ist, die einaxiale Druckfestigkeit durch indirekte Versuche, wie etwa den Punktlastversuch zu bestimmen. Ein weiterer Grund ist, dass Korrelationen zwischen der einaxialen Druckfestigkeit und der Bohrgeschwindigkeit sehr gute Ergebnisse liefern. Allgemein lässt sich sagen, dass mit einer hohen einaxialen Druckfestigkeit geringe Bohrgeschwindigkeiten einhergehen [89].

Spezifische Zerstörungsarbeit

Die spezifische Zerstörungsarbeit W_z ist ein Maß für die mechanische Arbeit, die zur vollständigen Zerstörung eines Prüfkörpers, bei einem einaxialen Druckversuch notwendig ist [90]. Zähne Proben können über den Post-failure Bereich hinaus unter einer starken Zunahme der Verformung des Prüfkörpers mehrfach belastet werden. Aus diesem Grund wandert der Bruchseitel bei der Beprobung derartiger Gesteine immer weiter nach rechts.

Die spezifische Zerstörungsarbeit errechnet sich aus der Fläche unter der Arbeitslinie des Versuchs, als Kraft mal Weg pro Volumeneinheit in $[kJ/m^3]$. Abbildung 2.25 zeigt eine solche Arbeitslinie für sprödes sowie für zähes Gestein. Bei der Betrachtung der Ergebnisse für die spezifische Zerstörungsarbeit fällt auf, dass für die Zerstörung der beiden Werkstoffe gleich viel Arbeit notwendig ist. Dies verdeutlicht den Umstand, dass zur Zerstörung von Gesteinen mit geringen Druckfestigkeiten und hohen Verformbarkeiten, sowie von Gesteinen mit hohen Druckfestigkeiten und geringen Verformbarkeit eine geringe Zerstörungsarbeit notwendig ist [91].

Die Zerstörungsarbeit ist ein Faktor, mit dem in der Praxis eine gute Korrelation mit der Bohrgeschwindigkeit hergestellt werden kann. Dies lässt sich anhand einer Energiebetrachtung des Bohrvorgangs begründen. Beim Bohren wird ein Teil der eingebrachten Energie ins Gebirge übertragen, wo diese zu Verformungen führt. Diese Verformungen bedingen den Bruch des Gesteins. Der restliche Teil der eingebrachten Energie wird reflektiert und im Bohrgerät durch die Resorption in Wärme umgewandelt. Aufgrund der Definition von Leistung als Arbeit pro

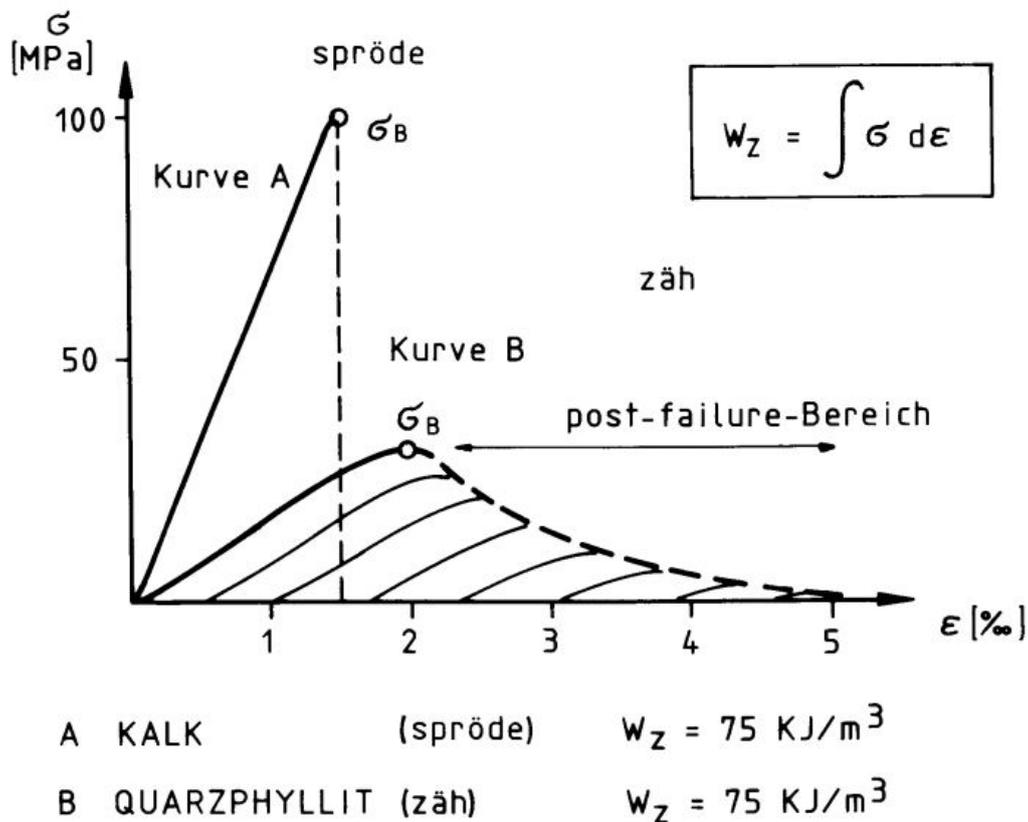


Abb. 2.25: Spannungs-Verformungsdiagramm eines spröden und eines zähen Prüfkörpers [91]

Zeiteinheit, wird ersichtlich, dass eine hohe spezifische Zerstörungsarbeit mit einem erhöhten Zeitaufwand zur Zerstörung des Gesteins einhergeht [42].

Quarzgehalt

Bei der Abschätzung der erzielbaren Bohrgeschwindigkeit spielt die Abrasivität des Gesteins eine große Rolle. Durch die Abrasivität ist nicht nur eine erhöhter Werkzeugverschleiß, sondern auch eine verringerte Bohrleistung - etwa durch stumpfe Bohrkronen und Meißel - bedingt. Die Abrasivität von Festgesteinen lässt sich anhand von unterschiedlichen Versuchen bestimmen. Der am häufigsten zum Einsatz kommende Versuch ist der CAI- bzw. Cerchar-Abrasivitätstest. Für diesen Versuch wird die kegelstümpfige Abnutzung eines Prüfstiftes ausgewertet, der unter einer konstanten Auflast 10 mm über die bruchraue Oberfläche eines Prüfkörpers bewegt wurde (siehe Abbildung 2.26). Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Abrasivität ist die Ermittlung des äquivalenten Quarzgehalts, dieser wird anhand von Dünnschliffproben bestimmt [75].

Zur Bestimmung der Abrasivität von Lockergesteinsproben wird der am Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées entwickelte LCPC Abrasivitätstest verwendet. Mit diesem Test ist es möglich Kornfraktionen zwischen 4-6,3 mm zu untersuchen.

Das an der TU-Wien entwickelten TU-Abrasimeter, das auf der Funktionsweise des LCPC Geräts aufbaut, ermöglicht es die unterschiedlichen Einflussfaktoren, wie etwa die Korngröße oder den Wassergehalt, auf den Verschleiß zu untersuchen. Des weiteren ermöglicht es dieses Gerät, Gesteinsproben von bis zu 20 mm Durchmesser zu untersuchen. Bei diesem Versuch

wird der Verschleiß eines definierten Stahlflügels bei 100 U/min unter einer definierten Auflast gemessen [70].

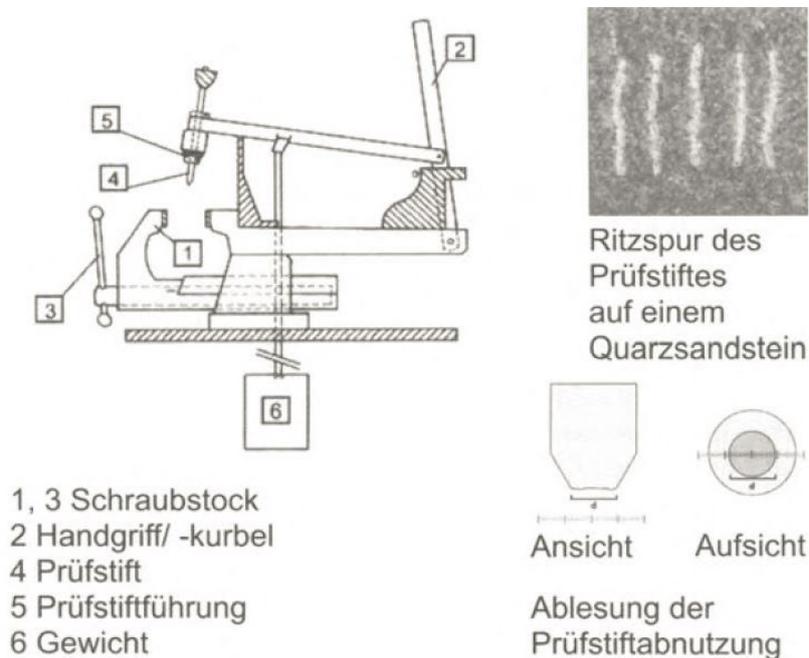


Abb. 2.26: Versuchsaufbau für den Cerchar-Abrasivitätstest und die damit erzeugten Ritzspuren [75]

2.3.2.2 Geologische Eigenschaften

Zu den wichtigsten geologischen Eigenschaften zählen die Klüftigkeit, die Auflockerung des Verbandes und die Lage der Schieferung des Gesteins zur Richtung der Bohrung sowie Veränderungen des Gebirgszustandes, wie etwa hydrothermale Zersetzungen. Diese Eigenschaften haben einen erheblichen Einfluss auf die erreichbaren Bohrgeschwindigkeiten [88].

Kluftabstand

Abbildung 2.27 verdeutlicht, dass die Bohrgeschwindigkeit nur durch sehr eng stehende Klüfte - der Kluftabstand ist kleiner oder gleich dem Bohrlochdurchmesser - beeinflusst wird. Je kleiner die Kluftabstände sind, desto größer ist der Einfluss auf die Bohrgeschwindigkeit. In gestörten Formationen kann sich die Bohrgeschwindigkeit verdoppeln. Derartig hohe Bohrgeschwindigkeiten müssen jedoch als Warnsignal für Störungszonen angesehen werden, in denen es oft zu Bohrlochverstürzen und dadurch zu einem Verklemmen des Bohrstranges kommen kann. Derartige Vorkommnisse verlangsamen den gesamten Bohrprozess, da in der Regel viel Zeit aufgewendet werden muss, um den Bohrstrang wieder frei zu bekommen [88].

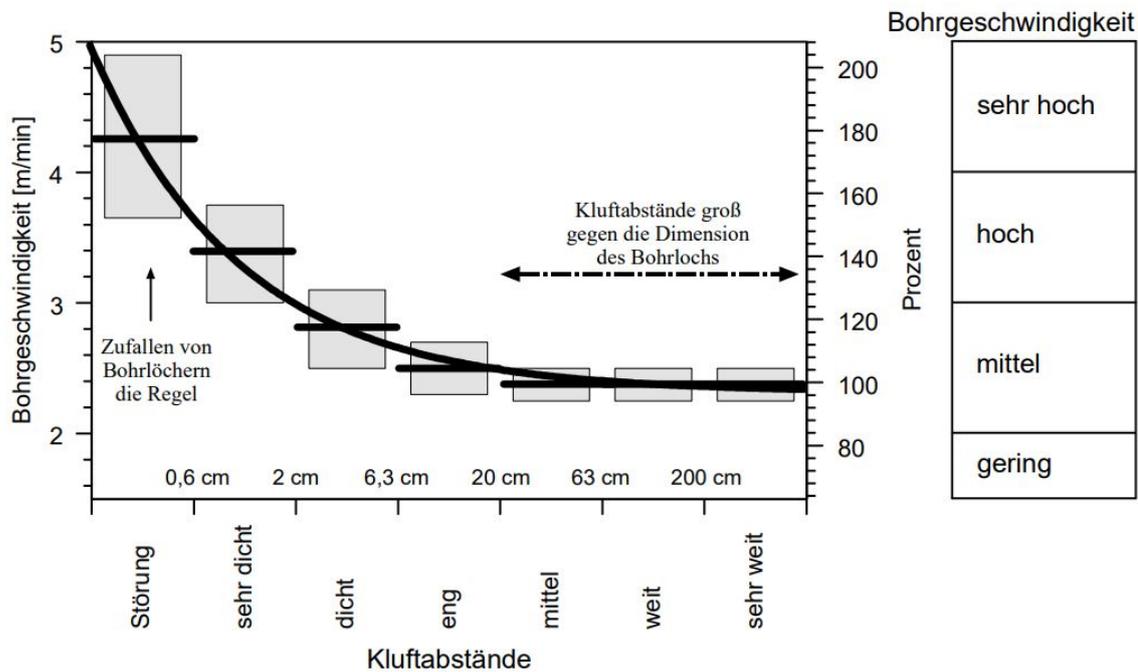


Abb. 2.27: Abhängigkeit der Bohrgeschwindigkeit vom Abstand der Klüfte [88]

Anisotropie

Der Einfluss der anisotropen Eigenschaften des Gebirges auf die Bohrgeschwindigkeit lässt sich am besten anhand von geschieferten Gesteinen erläutern. Hierfür wurde die Abhängigkeit des Winkels der Lasteinleitung auf die einaxiale Druckfestigkeit sowie die spezifische Zerstörungsarbeit betrachtet. Im linken Diagramm in Abbildung 2.28 ist die Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit vom Winkel der Schieferung dargestellt.

Die geringsten Werte der Druckfestigkeit traten bei diagonal zur Stirnfläche verlaufenden Schieferung auf. Die höchsten Werte wurden normal zur Schieferung erreicht, während parallel zu dieser nur 80 - 90% der Festigkeit erreicht wurden. Beim parallelen Lastfall konnten Trennbrüche parallel zur Schieferung beobachtet werden. Die normal zur Belastungsrichtung aufgetretenden Zugkräfte können die Ursache für die verringerte Druckfestigkeit sein. Das Diagramm auf der rechten Seite zeigt den Zusammenhang der Belastungsrichtung und der spezifischen Zerstörungsenergie. Bei diesen Versuchen wurden die höchsten Werte der Zerstörungsarbeit bei der Belastung parallel zur Schieferung aufgezeichnet. Diese Beobachtung lässt sich durch die höheren Verformungen, die ein ausgeprägteres Post-failure-Verhalten bedingten, erklären. [34].

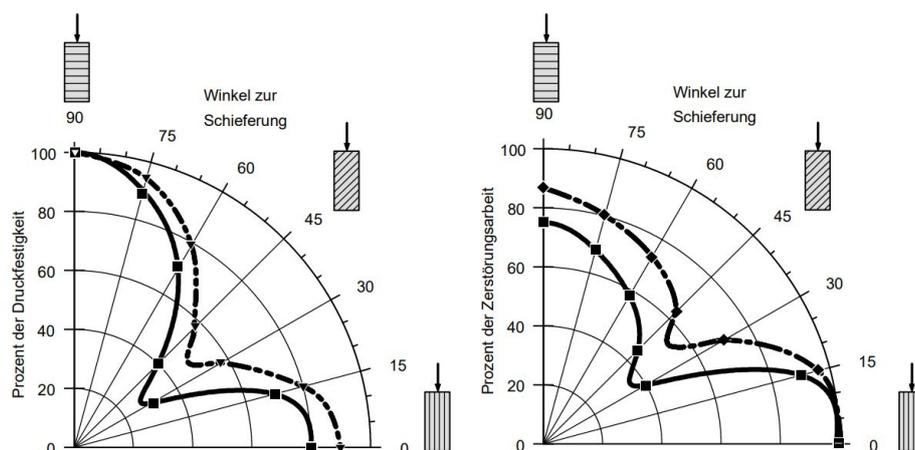


Abb. 2.28: Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit sowie der spezifischen Zerstörungsarbeit von der Einfallsrichtung der Schieferungsflächen für ein hochgradig anisotropes Gestein (Quarzphyllit mit glatten ebenen Schieferungsflächen; durchgehende Linie) und ein stark anisotropes Gestein (wellige Schieferungsflächen; gestrichelte Linie) [88]

Mikrogefüge

In Gesteinen mit einer plastisch deformierbaren Grundmasse und einem gering starren Verband können nur sehr niedrige Werte der Zerstörungsarbeit erzielt werden. Dies ist durch die hohe Verformbarkeit und die geringe Druckfestigkeit erklärbar, die aus der niedrigen Verbandsfestigkeit resultiert, da der Verband nur geringe Belastungen bei gleichzeitig fließenden Verformungen aufnehmen kann.

Werte hoher Zerstörungsarbeit werden vor allem in Bereichen mit einer höheren Körnigkeit und einem straffen Mikrogefüge angetroffen. Durch die hohe Verbandsfestigkeit und die starke Verzahnung der Gesteine ergeben sich hohe Druckfestigkeiten der Gesteine [88].

Verwitterungszustand

Ein zunehmender Grad der Verwitterung geht mit einer Abnahme der einaxialen Druckfestigkeit und somit einer Zunahme der erzielbaren Bohrgeschwindigkeit einher [89].

2.3.3 Mechanische Faktoren

Diese Faktoren sind abhängig von dem zum Einsatz kommenden Bohrverfahren. So wird für Kernbohrungen eine höhere Drehzahl benötigt, als etwa für Imlochhammerbohrungen. Die Bohrparameter müssen jedoch auf die angetroffene Geologie abgestimmt werden, um den bestmöglichen Bohrfortschritt zu gewährleisten. Eine zu hohe Vorschubkraft bedingt etwa bei Hammerbohrungen eine geringere Bohrgeschwindigkeit, da dadurch die Rotation des Hammers behindert ist [18].

2.3.4 Hydraulische Faktoren

Hydraulische Faktoren sind etwa die Geschwindigkeit und der Druck mit dem das Spülungsmedium im Bohrloch tiefsten austritt. Hiervon ist die Reinigung der Bohrlochsohle abhängig. Um hohe Bohrgeschwindigkeiten zu erzielen, ist es notwendig, eine Nachzerkleinerung der bereits erbohrten Cuttings zu vermeiden.

2.3.5 Bohrfluideigenschaften

Durch die Anpassung der Bohrlochspülung an die geologischen Randbedingungen ist es möglich, den Materialaustrag aus dem Bohrloch zu optimieren. Dies ist mit einer erhöhten Bohrgeschwindigkeit verbunden. Des Weiteren ist es notwendig das Bohrloch in gebräuchlichen Formationen zu stützen und somit Nachbrüchigkeiten zu vermeiden, da diese in den meisten Fällen mit zusätzlichen Aufwendungen verbunden sind.

2.4 Bohrabweichung

Aufgrund der verschiedenen geologischen und verfahrensbedingten Randbedingungen können keine allgemein gültigen Aussagen zur Lagegenauigkeit der einzelnen Bohrverfahren gemacht werden. Diese sind von den in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen Parametern abhängig. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden diese Parameter in geologische und verfahrensbedingte Einflüsse unterteilt.

2.4.1 Geologische Einflüsse

Die wichtigsten geologischen Einflüsse auf die Abweichung von Bohrungen von ihrem geplanten Verlauf sind die folgenden:

- Trennflächengefüge
- Schichtung
- Gesteinsfestigkeit
- Anisotropie des Gesteins
- Gravitationskraft in Kombination mit der Tragfähigkeit des Bodens

2.4.1.1 Trennflächengefüge

Durch die bei der Gebirgsbildung vorherrschenden Spannungsverhältnisse kam es zu einer Ausbildung von Trennflächen in den Gesteinen. Abhängig von der Art der Beanspruchung bei ihrer Entstehung können Trennflächen in Zug-, Druck- und Scherklüfte unterschieden werden. Zusätzlich zu diesen mechanischen Spannungszuständen können Trennflächen auch durch temperaturinduzierte Spannungen entstehen. Der Einfluss von Trennflächen auf Hohlräume oder Felsböschungen wird durch die folgenden Charakteristika beschrieben:

- Raumstellung
- Ausdehnung
- Rauigkeit
- Füllung
- Wasserführung
- Zugehörigkeit zu einer Schar

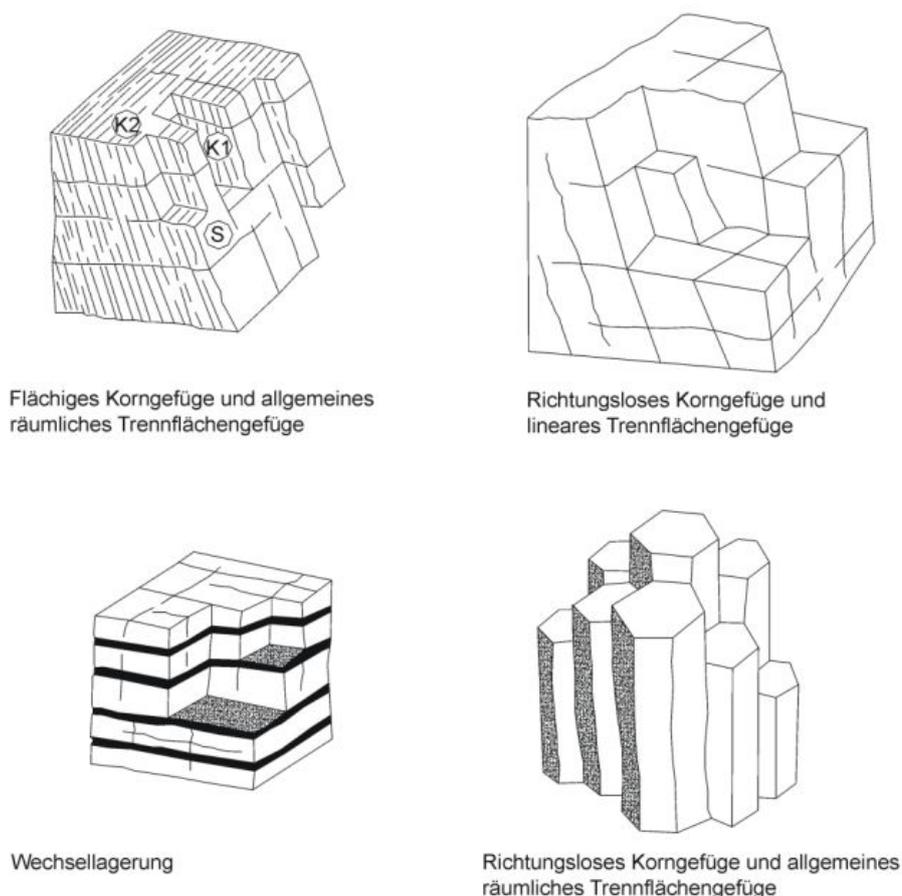


Abb. 2.29: Trennflächengefüge im Fels [86]

Durch den dreidimensionalen Spannungszustand, der bei der Entstehung der Trennflächen wirkte, kam es auch zu einer dreidimensionalen Ausbildung des Trennflächengefüges. Diese dreidimensionale Ausbildung ist für die Ausbildung von sogenannten Kluftkörpern (siehe Abbildung 2.29) verantwortlich [86].

Ein Antreffen von, in Bezug zur Bohrrichtung, steil einfallenden Gebirgsschichten, Klüften, Verwerfungen und anderen tektonisch bedingten Störungen des Gebirges kommt es, vor allem bei Schichten mit unterschiedlichen Festigkeiten, zu einer Abweichung des Bohrlochverlaufs. Das Bohrwerkzeug neigt dazu dem Bruchgefüge, abhängig vom Einfallwinkel, zu folgen und sich in die Richtung der einfallenden Formationen oder normal auf diese auszurichten [4]. Im Fall von Klüften mit weichen Füllungen folgt der Bohrkopf der Fallrichtung der Kluft. Sobald der Bohrkopf wieder auf harte Schichten trifft, richtet sich dieser wieder in seine ursprüngliche Richtung aus. Die Bohrlochabweichung variiert in Abhängigkeit von der Öffnung der Klüfte, deren Einfallrichtung und Zustand [83].

2.4.1.2 Schichtung

Die Abweichung des Bohrlochs variiert ja nach vom Winkel zwischen der Lochachse und der Schichtung des Gebirges. Bohrlöcher neigen dazu Schieferungen und Schichten im rechten Winkel

zu durchdringen, es sei denn, der Neigungswinkel der einfallenden Schichten beträgt 5 bis 10 Grad bezogen auf die Bohrlochachse. In diesem Fall folgen Bohrungen den geologischen Schichten. Aus diesem Grund kommt es bei flach einfallenden Schichten zu einer Abweichung nach oben. Im Falle von steilen Schichten werden hauptsächlich Abweichungen nach unten beobachtet. Im Allgemeinen ist die gemessene Abweichung umso höher, je geringer die Festigkeit der Schichten ist. Es wurde beobachtet, dass die Lochabweichung bei mächtigen Schichten geringer als bei dünnen Schichten ist. Die Lochabweichung zeigt sich umgekehrt proportional zum Schichtintervall, insbesondere im Fall von geneigten Schichten. Sobald der Bohrkopf in den unmittelbaren Nahbereich des geschichteten Gestein eindringt, kann das Gestein der auftretenden Spannung nicht länger standhalten und bricht entlang einer Bruchfläche senkrecht zur Richtung der Schieferung bis zur nächsten Schicht durch. Die Stärke der Bindung zwischen den Schichten hat Einfluss auf die Abweichung des Bohrlochs. Je schwächer der Kontakt, desto höher ist die Abweichung [83].

2.4.1.3 Gesteinsfestigkeit

In weichen Formationen kann eine ausgeprägte Bohrlochabweichung beobachtet werden. Die Biegung des Bohrstrangs bedingt eine erhöhte Reibung zwischen dem Bohrkopf und der Bohrlochwand, daraus resultiert eine Vergrößerung des Bohrlochdurchmessers in einem weichen Fels. Eine Vergrößerung des Bohrlochs geht mit einer Steigerung der Beanspruchung des Gesteins einher. Bei großen Rotationsgeschwindigkeiten kommt es im weichen Gestein zu größeren Abweichungen, da die Wirkung der Zentrifugalkraft größer ist. Je härter und kompakter das Gestein ist, desto ähnlicher ist sein Verhalten dem des homogenen, kompakten, idealen Gesteins. Im harten Fels, ohne geologische Störungen ist die Bohrlochabweichung geringer. Geologische Störungen haben einen großen Einfluss auf die Abweichung von Bohrlöchern im harten Fels. In Felsformationen mit abwechselnd harten und weichen Schichten richtet sich der Bohrkopf normal zur Richtung dieser Schichten aus. In Übergängen von harten zu weichen Schichten weicht der Bohrkopf nach unten aus und umgekehrt [83].

2.4.1.4 Anisotropie des Gesteins

Die Abweichung von Bohrlöchern ist nicht nur von der Gesteinsfestigkeit, sondern auch von den richtungsabhängigen Festigkeiten des Gesteins abhängig. Daher sind die Abweichungen in die Richtung der Schieferung sehr viel höher als normal dazu. Die Kräfte, die das Bohrloch von seinem geraden Verlauf ablenken, werden von der Wirkungsweise des Bohrkopfes in Kombination mit der Anisotropie des Gebirges verursacht [83].

2.4.1.5 Die Gravitationskraft in Kombination mit der Tragfähigkeit des Gebirges

In streng vertikalen Bohrlöchern kommt es zu keiner Abweichung des Bohrlochverlaufs durch die Gravitationskraft. Diese verläuft wie die Bohrung vertikal. In horizontalen Bohrlöchern hingegen bewirkt die Gravitation entweder ein Ansteigen oder ein Abfallen des Bohrlochverlaufs. So wird die Bohrung im Fall eines setzungsanfälligen Baugrundes abfallen, da der Boden den notwendigen Widerstand für den Bohrstrang nicht bietet. Im standfesten Baugrund kommt es zu einer Abweichung nach oben, da es zu geringen Setzungen im Bereich des Schwerpunkts des Bohrwerkzeugs kommt. Diese Setzungen bewirken, dass sich der Bohrkopf nach oben orientiert und die Bohrung somit nach oben abweicht [4]. Die Wirkung der Gravitation muss immer im Zusammenhang mit der Gesteinsfestigkeit beziehungsweise der Tragfähigkeit des Untergrunds betrachtet werden. Zur Erläuterung dieses Phänomens werden der Baugrund, zersetzter und kompakter Fels getrennt voneinander betrachtet [26].

Im zersetzten Fels

Im gering tragfähigem Fels kann das Gewicht des Bohrstranges beziehungsweise des Bohrkopfs die Tragfähigkeit des Untergrundes übersteigen, dadurch ist eine Stützung des Bohrwerkzeugs durch den Fels nicht gegeben und es kommt zu Setzungen im Bereich des Bohrkopfes. Abbildung 2.30 zeigt die ersten 35 m einer HDD Bohrung in stark zersetztem Granit. In dieser Abbildung ist ersichtlich, dass der Verlauf der Bohrung stark nach unten abfällt, obwohl es sich bei der zum Einsatz kommenden Bohrmethode um eine HDD Bohrung gehandelt hat. Der Grund hierfür ist die starke Zersetzung des Granits, die mit einer verminderten Tragfähigkeit einhergeht [26].

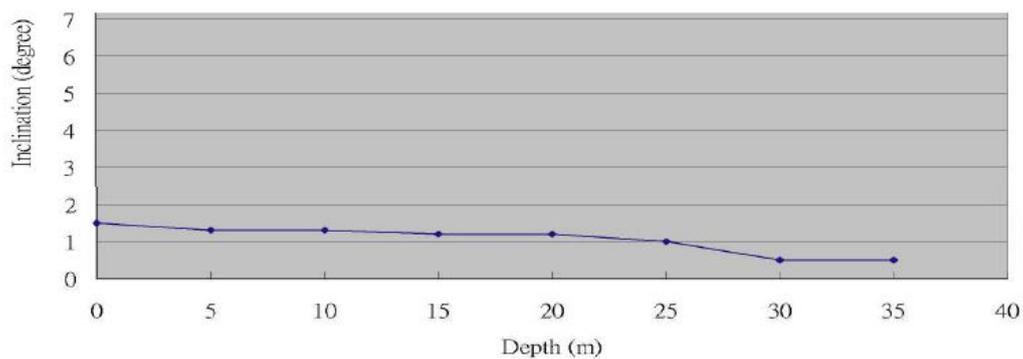


Abb. 2.30: Bohrlochverlauf einer HDD Bohrung in stark zersetztem Granit [26]

Im kompakten Fels

Durch die Gravitation kommt es im Bereich des Schwerpunkts des Bohrstranges zu Setzungen, diese bedingen, dass sich der Bohrkopf nach oben neigt (siehe Abbildung 2.31). Dieser Effekt tritt nur in sehr kompaktem und hartem Fels auf. Kombiniert mit der Rotation im Gegenuhrzeigersinn kommt es zu einer Abweichung nach links oben [62].



Abb. 2.31: Setzungsbedingte Abweichung einer Bohrung nach oben [62]

2.4.2 Verfahrensbedingte Abweichung

Die wichtigsten Ursachen aufgrund derer es zu verfahrensbedingten Abweichungen des Bohrverlaufs kommen kann, sind:

- Abweichung am Bohransatzpunkt
- Gewicht des Bohrwerkzeugs
- Rotationsrichtung
- Bohrlochdurchmesser
- Bohrlochspülung
- Bohrverfahren
- Geometrie des Bohrstrangs
- eventuell zum Einsatz kommende Stabilisatoren.

2.4.2.1 Abweichung am Bohransatzpunkt

Wie in Abbildung 2.32 ersichtlich ist, resultieren bereits sehr geringe Abweichungen am Bohransatzpunkt in großen Abweichungen im Bohrlochtieftsten [83].

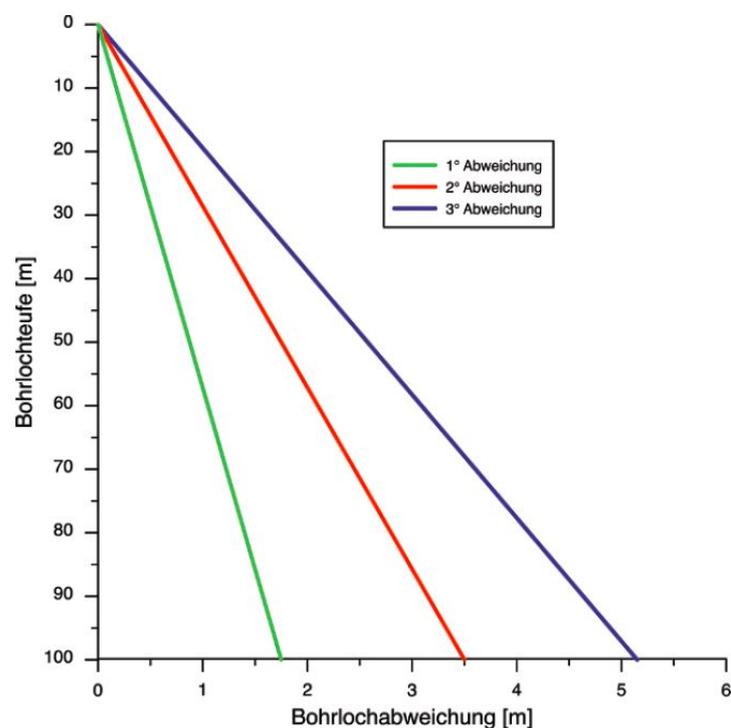


Abb. 2.32: Bohrlochabweichung in Abhängigkeit von der Fehlstellung der Lafette [28]

Daher ist das punktgenaue Einmessen des Bohransatzpunktes und das Ausrichten der Bohrlafette unerlässlich, um den geplanten Verlauf einer Bohrung erreichen zu können. So ergibt sich

durch eine um 1° falsch eingerichtete Bohrlafette nach 50 m Bohrlänge bereits eine Abweichung von etwa 0,9 m von der Solllage der Bohrung. Ein standfester Bohrplatz sowie die Verankerung des Bohrgeräts, um Bewegungen während der Bohrung zu verhindern, sind ebenso wichtig, da es bereits durch eine minimale Verschiebung des Bohrgeräts ebenfalls zu größeren Abweichungen kommen kann [28].

2.4.2.2 Gewicht des Bohrwerkzeugs

Ein hohes Gewicht des Bohrwerkzeugs verstärkt die durch die Gravitation auftretenden Effekte. Diese wurden in Kapitel 2.4.1.5 beschrieben.

2.4.2.3 Rotationsrichtung

Bei der Rotation von Bohrköpfen um eine perfekt gerade Achse kommt es zu keiner Änderung der Bohrrichtung. Aufgrund der Wirkungsweise von Hammerbohrungen kommt es zu keiner perfekten Rotation um die zentrale Achse. Es können folgende Erscheinungen auftreten:

- Eine radiale Zerkleinerung des Gesteins tritt bei aufeinanderfolgenden Hammerschlägen an den Kontaktpunkten des Hammers mit der Bohrlochwand auf. Durch die Drehung treten diese radialen Kontaktpunkte um den gesamten Umfang auf, dadurch entsteht ein Bohrloch, das größer ist als der Durchmesser der Bohrkrone.
- Bei einer normalen Rotation dreht sich der Meißel gegen die Bohrlochwand. Wird der Meißel kontinuierlich gegen dieselbe Stelle der Bohrlochwand gedrückt, so wandert der Meißel in diese Richtung [62].

Diese zwei Phänomene sind in Abbildung 2.33 zu erkennen.

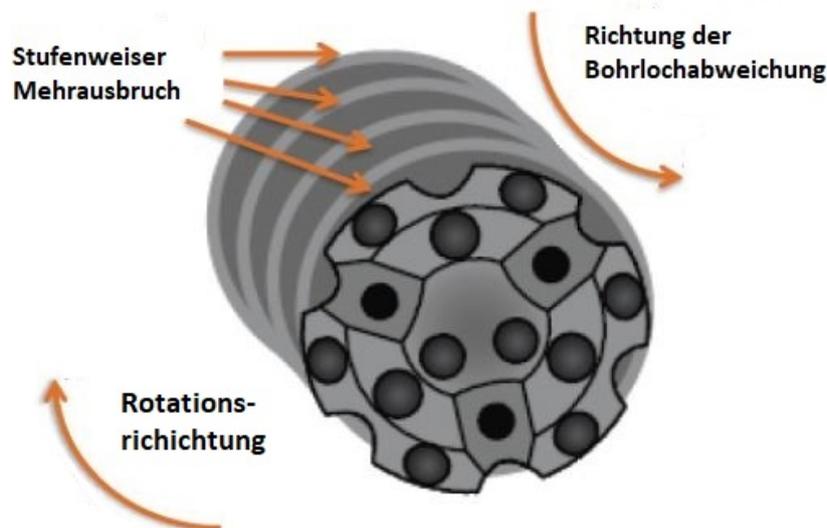


Abb. 2.33: Bohrlochabweichung infolge der Rotation des Bohrkopfs nach [62]

2.4.2.4 Bohrlochdurchmesser

Bohrungen mit kleineren Durchmessern neigen eher zu Abweichungen als großkalibrige Bohrlöcher. Die größere Abweichung der Bohrlöcher bei kleineren Durchmessern resultiert aus der geringeren Tangentiallänge aufgrund der verhältnismäßig geringeren Steifigkeit des Bohrstranges [83].

2.4.2.5 Bohrlochspülung

Durch die Verwendung einer auf das Gebirge und das Bohrsystem abgestimmten Spülung ist es möglich die Bohrlochwandung zu stützen und somit Nachbrüchigkeiten des Gebirges zu verhindern. Die Komponenten und Zusammensetzung von Bohrlochspülungen wurde in Kapitel 2.2 beschrieben.

2.4.2.6 Bohrverfahren

Rotary-Bohrverfahren benötigen zum Bohren in harten Formationen einen hohen Anpressdruck, dieser führt vor allem in geschichteten Formationen zu einer Abweichung vom Bohrverlauf. Im Vergleich dazu wird zum Bohren mit Imlochhammern ein geringerer Anpressdruck benötigt, daher ergeben sich geringere Abweichungen als beim Einsatz von Rotary-Bohrverfahren [46].

Im standfesten Fels kommt es abhängig vom bereits abgebohrten Verlauf der Bohrung und dem Anpressdruck entweder zu einem Anstieg oder Abfall der Bohrung, wie in Abbildung 2.34 erkennbar ist [26].

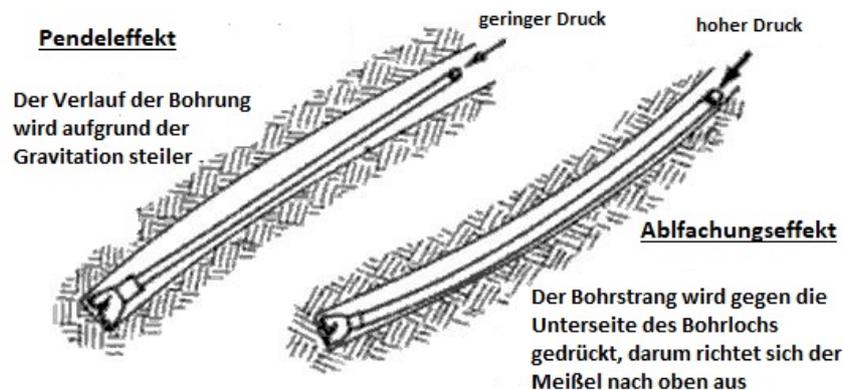


Abb. 2.34: Abweichung geneigte Bohrlöcher nach [4]

Zusätzlich zu diesem Effekt ist es möglich, dass es bei einem zu hohen Anpressdruck zu einem Ausknicken des Bohrstrangs kommt. Dieses Ausknicken bedingt, dass die Längsachse des Bohrkopfes nicht mehr normal auf die Ortsbrust steht und dadurch weitere Abweichungen verursacht werden [83].

2.4.2.7 Geometrie des Bohrstrangs

Im Hinblick auf die Länge der einzelnen Bohrgestänge gilt allgemein, je kürzer die einzelnen Gestängeschüsse sind, desto größer ist die spätere Abweichung vom Bohrlochverlauf. Die Form des Bohrkopfes hat ebenfalls einen Einfluss auf die Bohrrichtung [26]. Das Verhalten des Bohrstranges, unter der beim Bohren aufgebrachtten Belastung, spielt eine große Rolle für die Abweichung der Bohrung. Die Größe der Abweichung ist vom Zustand und den Eigenschaften des Bohrstrangs

abhängig. So haben Bohrröhre mit geringem Durchmesser einen negativen Einfluss auf die Bohrlochabweichung, da der geringe Durchmesser mit einer geringen Steifigkeit und somit einer geringen Tangentiallänge verbunden ist. Kommt es zum Ausknicken des Bohrstrangs, so kann dies selbst in homogenen Formationen zu großen Abweichungen führen. Ein idealer Bohrstrang sollte eine ausreichend große Steifigkeit haben, um die Abweichung des Bohrmeißels von der geplanten Achse zu verhindern. Die Abweichung ist im Allgemeinen proportional zur Zunahme der Flexibilität des Bohrstrangs und der Größe des Freischnitts zwischen Bohrlochwand und Bohrstrang. Ein flexibler Bohrstrang ist nicht in der Lage, Änderungen der Seitenkräfte auf das Bohrwerkzeug zu kompensieren. In Folge der Biegung des Bohrstrangs werden zusätzliche Ablenkkräfte generiert, wenn eine Belastung auf den Meißel ausgeübt wird. Bohrröhre erzeugen aufgrund ihrer höheren Biegesteifigkeit und der größeren kritischen Knicklast geringere Abweichungen als herkömmliche Bohrstränge. Die Verwendung von Doppelgestängen ist eine gute Möglichkeit um derartige Abweichungen zu verhindern [83]. Die Biegesteifigkeit ergibt sich aus einer Multiplikation des Trägheitsmoments mit dem zugehörigen E-Modul, da der E-Modul nur minimal verändert werden kann ist klar, dass zur Steigerung der Biegesteifigkeit eine Erhöhung des Trägheitsmoment notwendig ist. Das Trägheitsmoment eines Kreisrings ergibt sich zu:

$$I_y = I_z = \frac{\pi}{4}(R^4 - r^4) \quad (2.1)$$

wobei R den Radius bis zur Außenkante und r den Radius zur Innenkante darstellen. Daraus ergibt sich die Wandstärke eines Bohrröhres mit $R - r$. Aus diesem Zusammenhang wird ersichtlich, welche großen Einfluss die Wandstärke der Bohrröhre auf die Biegesteifigkeit des Bohrstrangs haben.

2.4.2.8 Stabilisatoren

Um Bohrungen richtungsstabil abzuteufen, müssen Maßnahmen getroffen werden, um die auf das Bohrwerkzeug wirkenden Kräfte zu minimieren, die zu ungewollten Änderungen der Richtung des Bohrverlaufs führen. Zu diesem Zweck ist es sinnvoll Stabilisatoren im Bohrstrang anzuordnen. Es können bis zu fünf Stabilisatoren eingesetzt werden. Durch deren Anordnung ist es möglich den Verlauf der Bohrung in ihrer vertikalen Ebene zu beeinflussen. In Abbildung 2.35 sind vier unterschiedliche Varianten zur Anordnung von Stabilisatoren ersichtlich. In a) sind keinerlei Stabilisatoren am Bohrstrang angeordnet. In b) ist ein stabilisierter Bohrstrang für eine Ablenkung nach oben zu erkennen. Der in c) abgebildete Bohrstrang dient richtungstreuem Bohren. Der Bohrstrang in d) soll die Bohrung nach unten ablenken.

Um die Wirkung der Stabilisatoren optimal ausnutzen zu können müssen diese im Nahbereich des Meißels angeordnet werden. Für die optimale Anordnung der Stabilisatoren gibt es verschiedene Rechenmodelle und analytische Modelle. Nicht nur die richtige Platzierung der Stabilisatoren hat einen Einfluss auf den Verlauf der Bohrung sondern auch die Länge dieser, da es bei zu kurz ausgeführten Stabilisatoren zu einem Verkanten im Bohrloch kommen kann. Die Möglichkeit der Beeinflussung der Bohrung in der horizontalen Ebene ist durch die fehlenden Einflüsse der Gravitation nicht gegeben [2]. Die unterschiedlichen Typen von Stabilisatoren sind in Abbildung 2.36 dargestellt.

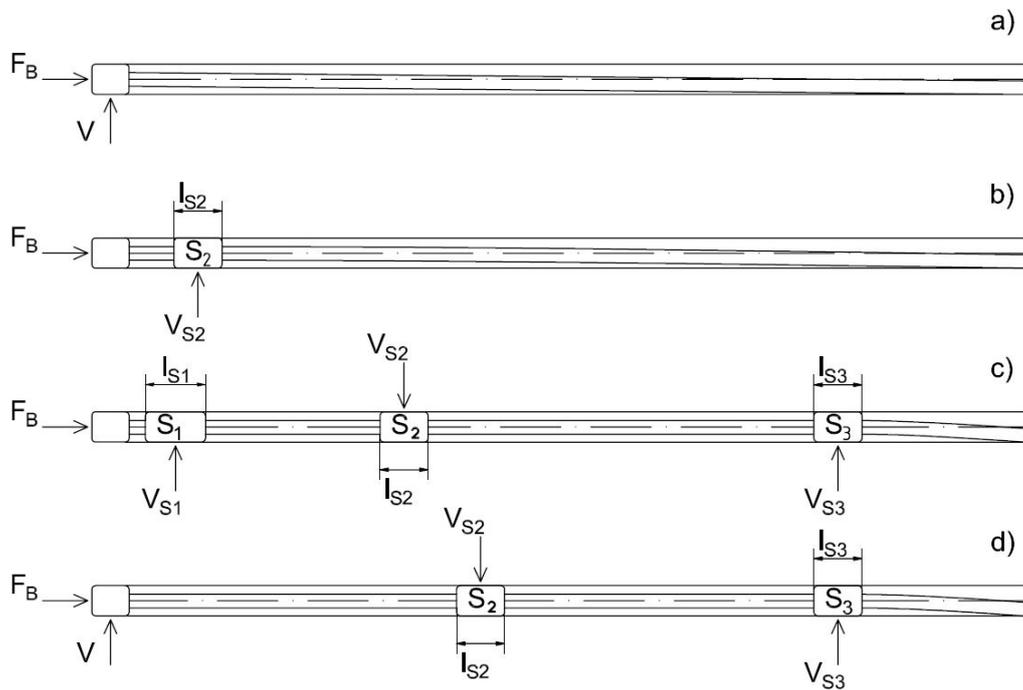


Abb. 2.35: Unterschiedliche Anordnung von Stabilisatoren nach [2]

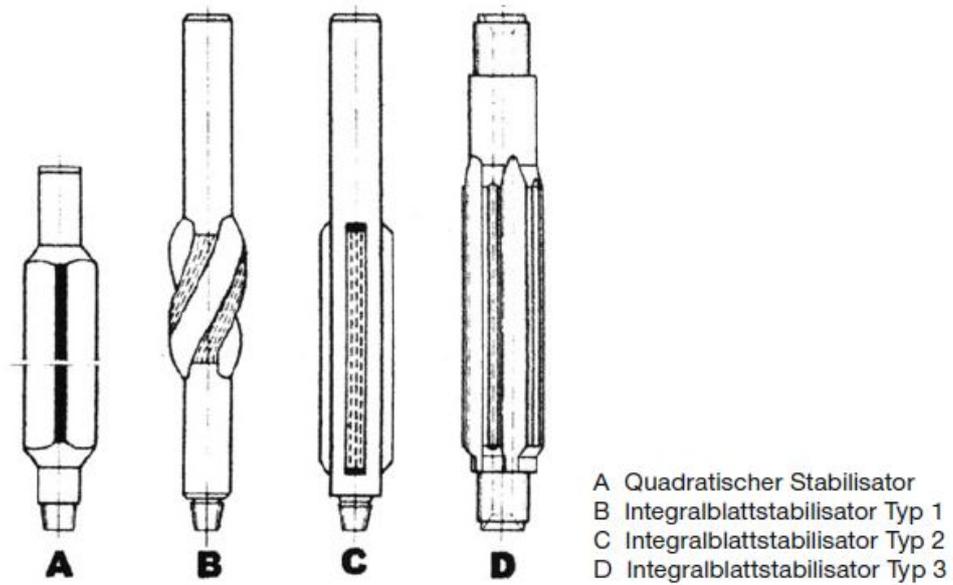


Abb. 2.36: Verschiedene Typen von Stabilisatoren [19]

Kapitel 3

Bohrlochvermessung

Für den Erfolg von zahlreichen Verfahren z.B. Injektionen, Vereisungskörpern und DSV-Säulen, spielen Bohrungen eine sehr wichtige Rolle. Um kostensparend zu arbeiten, wird in den meisten Fällen versucht, diese Bohrungen mit der größtmöglichen Länge auszuführen. Für den Erfolg der späteren Spezialtiefbaumaßnahme ist die Lagerichtigkeit der Bohrung von großer Bedeutung. Bei zu großen Abweichungen der Bohrungen vom geplanten Verlauf lassen sich dertige Verfahren nicht ohne weitere Maßnahmen umsetzen. Aus diesem Grund ist es unbedingt notwendig die Bohrungen zu vermessen. Bei gesteuerten Bohrungen ist eine laufende Vermessung der Bohrung notwendig, um während des Bohrvorgangs die entsprechenden Schritte für eine Richtungskorrektur setzen zu können [56]. Hierfür gibt es unterschiedliche Methoden, die auf verschiedenen Prinzipien basieren. Zum besseren Verständnis werden diese unterschiedlichen Prinzipien erläutert und danach die verschiedenen Methoden beschrieben.

3.1 Vermessungsprinzipien

In der Vermessungstechnik kommen folgende Messprinzipien zum Einsatz:

- Neigungssensoren
- Magnetismus
- Gyroskope
- optische Systeme.

3.1.1 Neigungssensoren

Die Vermessung mit Neigungssensoren stellt die älteste Art der Bohrlochvermessung dar. Heutzutage erfolgt die Vermessung mit Neigungssensoren meist mit kapazitiven Flüssigkeits-Neigungs-Sensoren. Das Messprinzip beruht auf einer Änderung der Kapazität von Kondensatoren. Hierfür werden dielektrische Flüssigkeiten als Teilfüllungen zwischen den Elektroden eines Kondensators eingesetzt. Abhängig von der relativen Neigung der Elektroden kommt es zu einer Änderung der Kapazität des Kondensators. Daraus lässt sich der Winkel der Neigung zur vertikalen Achse errechnen. Die Verwendung von MEMS (Micro Electro Mechanical Sensor) nimmt in letzter Zeit zu, da die Vorteile ihrer kleinen Bauweise und der geringe Energieverbrauch überwiegen. Derartige Systeme sind eine Kombination aus verschiedenen Sensoren, elektronischen Schaltungen, mechanischen Elementen und Aktoren, die auf einem Chip oder Ähnlichem angeordnet sind. Zur Vermessung der vertikalen beziehungsweise der horizontalen Abweichung muss bei diesem System lediglich die Einbaurichtung geändert werden. Für Verfahren bei denen eine dauerhafte Überwachung der Lage notwendig ist, wurden im Bohrstrang integrierte Inklinometer entwickelt.

Zur absoluten, aber auch zur relativen, Bestimmung des Azimuts werden zusätzliche Informationen über die Drehwinkel des Geräts benötigt. Diese können entweder aus einer Zwangsführung der Sonde oder einer zusätzlichen Messung erhalten werden [56].

3.1.2 Magnetismus

Die bestimmen [56]. Hierfür gibt es zwei verschiedene Grundprinzipien der Messung:

- Kompassmessung
- Elektronische Messung

Bei der Bohrlochvermessung mit Hilfe von Kompassen kommen verschiedene Kompassmodelle zur Anwendung. Abhängig vom Modell schwebt der Kompass mitsamt der Neigungsanzeige in einer Flüssigkeit. Andere Systeme verwenden ein kardanisch aufgehängtes Pendel. Dies sind Pendel, die um zwei im rechten Winkel zueinander stehende Achsen frei drehbar gelagert sind. Bei der Vermessung mit den kardanischen Pendeln bewegen sich die Pendel über eine Windrose, auf der die Himmelsrichtungen aufgetragen sind. Bei diesem Messverfahren erfolgt die Aufzeichnung anhand eines Fotos, das mit Hilfe einer im System integrierten Kamera aufgezeichnet wird.

Eine andere Methode ist die Vermessung mit Fluxgate-Magnetometern in Kombination mit Inklinometern. Hierbei vermisst das Magnetometer die Raumkoordinaten des Magnetfelds der Erde. Daraus lässt sich über die vektorielle Summe der Komponenten die Richtung bestimmen. Die Komponente der Erdanziehungskraft wird mittels eines dreiachsigen Inklinometers vermessen. Dadurch kann die Neigung der Bohrung bestimmt werden [76]. Mit Hilfe der gesammelten Daten ist es möglich 3-D Aufnahmen von Bohrungen zu erstellen. Geologische und künstliche magnetische Störungen haben einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Messergebnisse. Das Bohrgestänge zählt ebenfalls zu diesen Störquellen [56].

3.1.3 Gyroskope (Kreiselsysteme)

Hierbei handelt es sich um geschlossene Systeme mit konstantem Drehimpuls [56]. Kreisel, sind kreisförmige symmetrische Massen, die um eine stiftförmige Achse rotieren. Abhängig von der Lagerung werden ein-, zwei-, oder dreiachsige Kreisel unterschieden [9]. Wird die Drehachse des Kreisels durch den Einfluss einer äußeren Kraft gekippt, so entsteht ein Drehmoment. Zur Bewahrung des Gesamtimpulses kippt die Achse des Kreisels lotrecht zur angreifenden Kraft. Daraus ergeben sich am Kreisel folgende Messprinzipien:

- Aus der Massenträgheit ergibt sich das Bestreben eines frei laufenden Kreisels die Richtung der Drehachse im Inertialraum beizubehalten. Daraus ergibt sich der Bezug zur Lage.
- Aus dem Satz vom Drehimpuls ergibt sich, dass ein sich in Bewegung befindlicher Kreisel, auf den eine äußere Kraft wirkt, die versucht seine Achsrichtung zu ändern, normal - im Sinne der Drehrichtung - zu dieser Kraft ausweicht [56]. Dieses Ausweichen wird Präzession genannt. Dadurch zeigt die Laufachse des Kreisels nach Norden [9].

Diese zwei Gesetzmäßigkeiten bilden die Grundlage für alle auf Kreiseln basierenden Messsysteme [56]. Durch die in Hightech-Kreiseln integrierten elektronischen Feinregistrierungen, an welche elektronische Signalepunkte gekoppelt sind, ist es möglich, dass die vektoriellen Änderungen direkt in Raumdaten umgerechnet werden.

In der militärischen Luftfahrt befinden sich Laserkreisel und später Faserkreisel seit den 1970er Jahren im Einsatz. Diese Messsysteme wurden entwickelt, um unabhängig von Störungen des

Magnetfelds Positionsmessungen im dreidimensionalen Raum zu ermöglichen. Die Messung mittels Faserkreisel erfolgt durch die Messung von Laufzeitunterschieden eines Lichtstrahls, der eine aufgewickelte Glasfaser in zwei unterschiedlichen Richtungen durchläuft. Abhängig von der Drehung der Spule im Raum kommt es zu einer Phasenverschiebung bei der Interferenz der beiden Lichtwellen. Durch diese Phasenverschiebungen kann auf die Winkelgeschwindigkeiten rückgeschlossen werden. Durch eine Kombination mit der Messung der linearen Geschwindigkeit ist die Ermittlung der Position in einem Bezugskordinatensystem möglich. Mit derartigen Messsystemen sind Genauigkeiten von bis zu 1‰ möglich [9].

3.1.4 Optische Systeme

Bevor mit einer Bohrung begonnen wird, ist es notwendig die Lafette am Bohransatzpunkt genau einzurichten. Dies geschieht mit Hilfe von an der Bohrlafette angeordneten Vermessungsspiegeln und einem Theodoliten oder einer Totalstation. Beim Theodoliten handelt es sich um ein mobiles Vermessungssystem zum Messen von Richtungen und Winkeln. Totalstationen oder Tachymeter sind eine Kombination eines Richtungssensors und eines Distanzmessers, die im äußeren Aufbau einem Theodoliten gleichen. Diese Systeme werden zur Bestimmung der Lage von räumlichen Koordinaten verwendet. Elektronische Tachymeter mit austauschbaren Speichermedien sind mit Mikroprozessoren ausgestattet und daher in der Lage externe Programme auszuführen. Im Fall von mit Zieldetektoren versehenen Tachymetern ist die Möglichkeit des Trackings des Zielpunktes vorhanden. Dies bedeutet, dass das Aufnehmen von Punkten sowie das Abstecken von Punkten von einer Person ausgeführt werden kann, da die Totalstation mit einer am Zielpunkt angeordneten Steuereinheit über den Datenfunk kommuniziert. Zur Positionierung derartiger Systeme im Raum gibt es verschiedene Möglichkeiten. Eine Möglichkeit ist die Stationierung des Geräts über bekannte Fixpunkte. Hierfür muss eine ausreichende Anzahl an Fixpunkten eingemessen werden, sodass sich das Gerät seine eigene Position errechnen kann. Von dieser Position ausgehend, ist es möglich neue Punkte im Raum abzustecken. Eine weitere Möglichkeit ist das Abstecken mit Hilfe eines Realtime-GPS Systems. Hierfür wird der Referenzempfänger auf einem bekannten Punkt aufgestellt, mit dem Rover - einem weiteren Empfänger - kann die Lage der gesuchten Punkte ermittelt werden [33].

Kurze Bohrungen, bei denen der Endpunkt der Bohrung im Sichtbereich einer Totalstation liegt, können auch mit einer solchen vermessen werden. Hierfür wird ein beleuchtetes Prisma in die Bohrung eingeführt. Diese Art der Bohrlochvermessung stößt jedoch relativ schnell an ihre Grenzen, da das Prisma bereits wegen geringer Bohrlochabweichungen nicht mehr im Sichtbereich der Totalstation liegt.

Zur optischen Vermessung langer Bohrungen werden Geräte mit dem Namen MAXIBOR® verwendet. Dieses System misst die Verschiebung zwischen zwei reflektierenden Ringen, die in einem definierten Abstand zueinander angeordnet sind (siehe Abbildung 3.1). Mit Hilfe einer in der Mittelachse der Bohrung angeordneten Digitalkamera wird dies erreicht.

Kombiniert mit einer Messung der Neigung und des Rollwinkels der Kamera erfolgt eine absolute Vermessung im Bezug zur horizontalen und eine relative Vermessung im Bezug zum Azimut der Bohrung. Der Verlauf der Bohrung wird durch die Integration beziehungsweise die Aufsummierung der einzelnen Messungen errechnet [56]. Diese Art der Bohrlochvermessung erfolgt unabhängig vom Magnetfeld der Erde, daher kommt es zu keiner Verfälschung der Messergebnisse durch äußere Störsignale. [85]

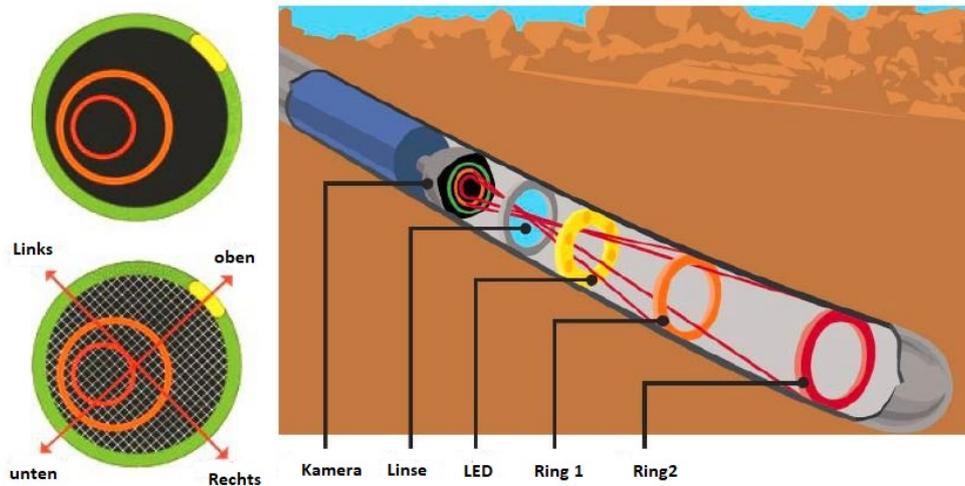


Abb. 3.1: Optische Bohrlochvermessung [56].

3.2 Bohrlochvermessungssysteme

Nachfolgend werden die am häufig zum Einsatz kommenden Vermessungssysteme beschrieben. Diese sind:

- Theodolit
- Ketteninklinometer
- Walk-Over-Verfahren
- Electronic Multishot System
- Wire-line-Verfahren
- Ortung mit künstlichen Magnetfeldern
- Drill-Pilot®

3.2.1 Theodolit

Der Theodolit dient vorrangig dem lagemäßigen Einmessen von Bohransatzpunkten. Zum Vermessen von Bohrlochverläufen ist er in den meisten Fällen ungeeignet, da hierfür die Sicht zwischen Vermessungsgerät und -spiegel frei sein muss [56]. Zum Einmessen von Bohransatzpunkten muss das Gerät im Raum stationiert werden, dies bedeutet, dass es sich über das Einmessen bekannter Fixpunkte seine eigene Lage errechnet [33]. Nach der erfolgreichen Stationierung des Geräts wird die Bohrlafette, an der zwei Vermessungsspiegel angeordnet sind, so ausgerichtet, dass die Verlängerung der Achse der Lafette den Start- sowie den Zielpunkt der Bohrung schneidet. Durch die auf der Bohrlafette befestigten Spiegel wird die spätere Bohrrichtung genau vorgegeben, die Sollrichtung der Bohrung ist dem System bekannt. Decken sich die beiden Verläufe, so ist die Bohrung eingerichtet. Vor dem Beginn der Vermessung müssen alle relevanten Daten in das System eingespielt werden [95].

3.2.2 Ketteninklinometer

Die Verwendung von Inklinometersonden ist auf Bohrlöcher mit einer maximalen Neigung von 45° limitiert, da sich die Sonde am Graviationsfeld der Erde orientiert. Daher kann sie Änderungen des Azimuts in stark geneigten Bohrlöchern nicht mehr wahrnehmen. Um dieses Problem zu umgehen, werden sogenannte Ketteninklinometer eingesetzt [53]. Das Ketteninklinometer besteht aus mehreren Neigungsmesssonden, die über kardanische Gelenke miteinander verbunden sind. Die Gesamtverformung ergibt sich durch die Aufsummierung der von den einzelnen Sonden gemessenen Auslenkungen zur Messrichtung. Diese Messergebnisse beziehen sich auf eine dem Messvorgang vorhergegangene Erstmessung [43]. Die mit diesem Verfahren messbaren Bohrlängen sind aufgrund von Genauigkeits- bzw. Handhabungsgründen begrenzt [53].

3.2.3 Walk-Over

Dieses System kommt vorrangig bei oberflächennahen HDD-Bohrungen zum Einsatz, da es nur für Tiefen < 20 m unter der Geländeoberkante verwendet werden kann. Eine weitere Einschränkung für die Verwendung dieses Systems stellen Störsignale zwischen Bohrung und Erdoberfläche dar. Diese können die Reichweite der Datenübertragung stark einschränken.

Die Vermessung mit dem Walk-Over-System erfolgt so, dass ein Sender, der hinter dem Bohrkopf angebracht ist, die Vermessungsdaten zur Oberfläche sendet, wo diese Daten mit Hilfe eines Empfängers an das Bedienpult der Bohranlage gesendet und ausgewertet werden (Abbildung 3.2). Die Signalstärke ist abhängig von der Tiefe des Senders. Aus diesem Grund sind auch Rückschlüsse über die Tiefe der Bohrung möglich. Die Sender befinden sich in fester geometrischer Anordnung rund um den Bohrkopf, (90° zueinander) durch diese Anordnung sind auch Rückschlüsse auf die Verrollung des Bohrkopfes möglich. Diese Rückschlüsse sind für das Steuern der Bohrung von großer Bedeutung, da dadurch zu jedem Zeitpunkt ersichtlich ist, wie der Steuerbohrkopf im Bohrloch orientiert ist [9]. Im Sender des Walk-Over-Systems sind mindestens ein Inklinometer, zur Feststellung der Neigung, ein Sender zum Messen des Toolfaces (hierbei handelt es sich um die Meißelstellung) und ein Oszillator, zur Übermittlung der gesammelten Daten, untergebracht [38]. Für Bohrungen in größeren Tiefen kommt das sogenannte Wire-Line-Verfahren zum Einsatz [9].

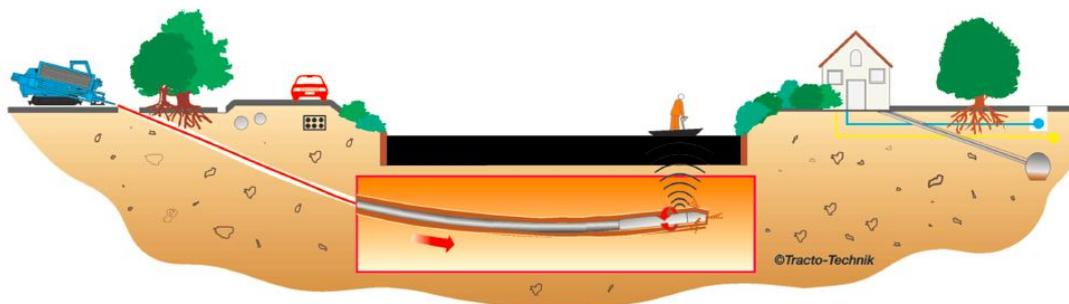


Abb. 3.2: Walk-Over-Verfahren [8]

3.2.4 Electronic Multishot System (EMS)

Dieses System wird vorallem zur Vermessung von bereits gebohrten Bohrlöchern verwendet. Hierfür wird es mit Hilfe einer Winde in das Bohrloch eingebracht. Dort werden bis zu 8142 Messpunkte automatisch aufgezeichnet. Gemessen werden sowohl der Azimut als auch die Neigung

des Bohrlochs. Nach der Bergung der Vermessungssonde können die gewonnenen Daten per USB Kabel auf einen PC übertragen und ausgewertet werden. EMS System können auch zur permanenten Überwachung von gesteuerten Bohrungen herangezogen werden. Hierfür wird das System etwa an einem MUD-Motor befestigt und die gewonnenen Daten werden permanent über ein Kabel zur Oberfläche hin geleitet. Des Weiteren können EMS-Systeme zur Gewinnung von orientierten Bohrkernen genutzt werden [69].

3.2.5 Wire-line-Verfahren

Hierbei handelt es sich um eine Weiterentwicklung des aus der Tiefbohrtechnik kommenden Wire-line Logging Technique Verfahrens (WLT-Kabelmessverfahren). Mit diesem Verfahren ist es möglich, die an der Ortsbrust gesammelten Daten in Echtzeit zum Bohrmeister zu übermitteln. Bei den gesammelten Daten handelt es sich um die Neigung, den Azimut und die Meißelorientierung [38]. Die Messung des Azimuts erfolgt in den meisten Fällen mit Hilfe von Magnetometern. Aus diesem Grund muss der Teil des Bohrstrangs, in dem sich diese befinden aus antimagnetischem Stahl gefertigt sein. Dieser ist jedoch sehr belastungsempfindlich. Alternativ zu den Magnetometern kann zur Messung des Azimuts ein auf Kreiseln basierendes Vermessungssystem verwendet werden. Die Messung der Neigung und der Verrollung erfolgt anhand der Gravitation oder mit Hilfe von Beschleunigungssensoren [9]. Diese Daten werden mit Hilfe eines Kabels zum Steuerstand des Bohrgeräts übermittelt. Aus diesem Grund muss das Kabel großen Belastungen standhalten, die hohe Spülungsgeschwindigkeit und abrasive Anteile in der Bohrspülung sind nur Beispiele für eine mögliche Belastung. Mit jedem Rohr, das neu in den Bohrstrang eingebaut wird, muss auch das zur Datenübertragung benötigte Kabel verlängert werden [38].

3.2.6 Ortung mit künstlichen Magnetfeldern

Aufgrund lokaler, meist durch Menschenhand verursachter Störsignale, die das Magnetfeld der Erde betreffen, werden häufig künstliche Magnetfelder angelegt, um Bohrungen zu orten. Derartige Magnetfelder übertreffen das natürliche Magnetfeld der Erde um ein vielfaches. Hergestellt werden sie durch das Auslegen von Kabeln, die von Gleichstrom mit einer hohen Stromstärke durchflossen werden. Wichtig für die spätere Vermessung ist, dass das Kabel rechteckförmig die Bohrungen umschließend ausgelegt wird. Dabei ist weiters zu beachten, dass die langen Schenkel zueinander sowie zu den Bohrungen parallel verlegt werden [9].

3.2.7 Drill-Pilot®

Hierbei handelt es sich um eine auf Kreiselsystemen basierende Messsonde, die von der Firma Züblin Spezialtiefbau entwickelt wurde. Da es möglich ist, den Drill-Pilot direkt hinter dem Bohrkopf anzuordnen, liefert dieser während der gesamten Bohrung exakte Messergebnisse über den Verlauf. Diese Messergebnisse werden auf einem Bedienerbildschirm in Echtzeit in Form von graphischen Bohrlochverläufen angezeigt. Der Fehlbetrag der Messungen mit diesem System beträgt maximal 0,5%. Mit dieser Messsonde ist es möglich Bohrlöcher mit Längen von bis zu 300 m unabhängig von ihrer Ausrichtung zu vermessen [99].

Teil II

Gerichtetes und gesteuertes Bohren

Kapitel 1

Gerichtetes Bohren

Unter einer gerichteten Bohrung versteht man eine Bohrung, deren Verlauf das in der Planung festgelegte Ziel nur durch passive Maßnahmen erreicht. Das bedeutet, dass der Verlauf der Bohrung während des Bohrvorgangs nicht durch aktive Steuerungsmaßnahmen beeinflusst werden kann.

Für diese Verfahren ist es besonders wichtig den Baugrund genauestens zu analysieren und das zur Ausführung kommende Bohrsystem auf diesen abzustimmen. Bei gerichteten Bohrungen ist das genaue Einrichten der Bohrung, das heißt das genaue Einmessen des Bohransatzpunktes und die Ausrichtung der Bohrlafette, unabdingbar notwendig, da der Verlauf der Bohrung allein durch diesen Vorgang beeinflusst werden kann. Des Weiteren ist es möglich den geologisch- und verfahrensbedingten Abweichungen, welche in Abschnitt 1 Kapitel 2.4.1 beschrieben wurden, durch ein Übermaß beim Einrichten der Bohrung entgegen zu wirken. Dies bedeutet, dass beispielsweise Horizontalbohrungen, bei denen ein Abdriften des Verlaufs nach rechts unten, aufgrund der Rechtsdrehung des Meißels sowie einer nicht standhaften Geologie, zu erwarten ist, so eingerichtet werden, dass diese Abweichungen durch das Übermaß kompensiert werden. Hierbei handelt es sich um einen iterativen Prozess, der an die geologischen und verfahrensspezifischen Randbedingungen, sowie die Länge der Bohrung angepasst werden muss. Eine weitere Möglichkeit, um etwaigen Abweichungen der Bohrung entgegenzuwirken, ist die Anordnung von Stabilisatoren. Dies wurde in Abschnitt 1 Kapitel 2.4.2.8 bereits beschrieben.

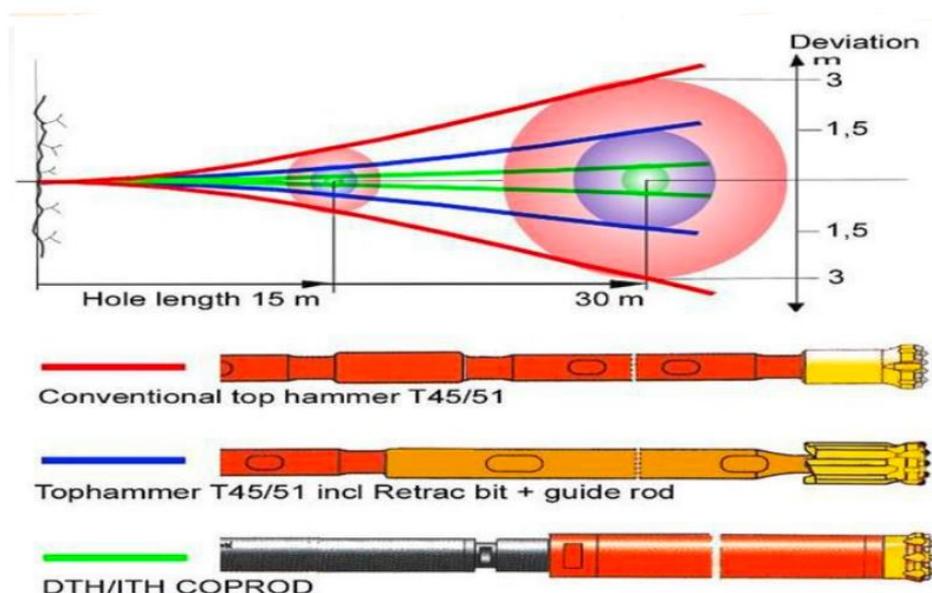


Abb. 1.1: Vergleich der mit den unterschiedlichen Hammersystemen generierten Abweichungen [25]

Gerichtete Bohrungen können grundsätzlich mit allen Verfahren ausgeführt werden. Es ist jedoch zu erwähnen, dass sich einige Bohrverfahren aufgrund ihrer Wirkungsweise weniger eignen. So werden etwa mit einer Außenhammerbohrung viel größere Abweichungen generiert als mit einer Imlochhammerbohrung. Ein Vergleich der unterschiedlichen Abweichungen, abhängig von dem zum Einsatz kommenden Hammersystem und der Größe der Bohrröhre, ist in Abbildung 1.1 ersichtlich.

1.1 Drehende Bohrverfahren

Zu den drehenden Bohrverfahren, mit denen gerichtete Bohrungen ausgeführt werden können, gehören:

- die Rotationskernbohrung
- die Schneckenbohrung
- die Rotarybohrung

1.1.1 Rotationskernbohrung

Rotationskernbohrungen werden vorwiegend zur Erkundung des Untergrundes verwendet. Mit diesen Verfahren ist es möglich Bohrkerne für spätere Versuche und Untersuchungen zu erbohren. Zum Einsatz kommen unterschiedliche Typen von Kernrohren, die sich durch ihren Aufbau unterscheiden. So sind mit Einfachkernrohren im Vergleich zu den anderen Verfahren, aufgrund der schmalen Lippen der Bohrkronen relativ hohe Bohrgeschwindigkeiten möglich. Eine negative Eigenschaft von Einfachkernrohren ist, dass diese nur in kompaktem Fels eingesetzt werden können, da es in gebräuchlichen Formationen zu Ausspülungen des anstehenden Gebirges kommen kann. Doppelkernrohre können aufgrund ihres Aufbaus in gestörten Formationen eingesetzt werden. Aufgebaut sind diese Kernrohre aus zwei Rohren, die mit Hilfe von Kugellagern drehbar gegeneinander gelagert sind. Aus diesem Grund wird der Bohrkern im Vergleich zu Einfachkernrohren während des Bohrens weniger beansprucht.

Dreifachkernrohre werden für Rotationskernbohrungen in sehr brüchigen und weichen Formationen eingesetzt. Bei diesem Verfahren wird der Bohrkern zusätzlich mit einem Plastikrohr einem sogenannten Inliner geschützt.

Die Kernrohre von Seilkernrohren werden entweder als Doppel- oder Dreifachkernrohr ausgeführt. Der Unterschied zu diesen beiden Verfahren ist jedoch, dass es beim Bohren mit dem Seilkernrohr bei der Bergung des Bohrkerns möglich ist das Gestänge im Bohrloch zu belassen. Zur Entnahme des Bohrkerns wird das Kernrohr mit Hilfe einer an einem Seil befestigten Fangvorrichtung aus dem Bohrloch entnommen.

Da zur Bergung des Bohrkerns bei Einfach-, Doppel-, sowie Dreifachkerbohrverfahren, immer der gesamte Bohrstrang ausgebaut werden muss, sind mit diesen Verfahren bei größeren Bohrlängen nur sehr geringe Bohrgeschwindigkeiten möglich. Der Zeitaufwand für das Bohren sowie das Ziehen für je einen Meter Bohrstrecke mit einem Doppelkernrohr (1) sowie einem Seilkernrohr (2) ist in Abbildung 1.2 ersichtlich. Diese Verfahren können jedoch für kurze Bohrungen ebenso wirtschaftlich eingesetzt werden. Im Vergleich zu Imlochhammerverfahren werden mit Rotationskernbohrungen, unabhängig von der Bohrrichtung, die geringsten Abweichungen vom geplanten Verlauf der Bohrung generiert [57].

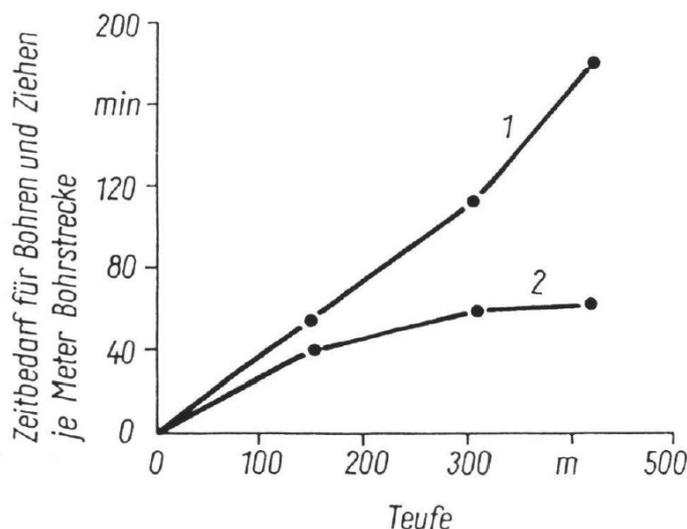


Abb. 1.2: Vergleich der Bohrzeit von Bohrungen mit Doppelkernrohr und Seilkernrohr [11]

1.1.2 Schneckenbohrung

Schneckenbohrungen kommen vor allem im Lockergestein zum Einsatz. In derartigen Böden stellen sie ein schnelles und kostengünstiges Verfahren dar, da auf den Einsatz einer Bohrspülung verzichtet werden kann. Im Bereich des Grundwassers können mit diesem Verfahren nur in bindigen Böden brauchbare Ergebnisse erzielt werden. In derartigen Böden sind maximale Bohrtiefen von 25 m erreichbar [19]. Durch den Einsatz von Hohlbohrschnecken ist es möglich Bohrkerne zu gewinnen, verschiedene Einbauten im Bohrloch im Schutz der Verrohrung vorzunehmen und den Boden auf unterschiedliche Weise - etwa mit Standard Penetration Tests - zu beproben.

1.1.3 Rotarybohrung

Diese aus der Tiefbohrtechnik stammenden Verfahren lassen sich in den unterschiedlichsten Felsformationen einsetzen. Dies wird durch eine Vielzahl an unterschiedlichen Meißeln sichergestellt. Es kommen entweder Rollenmeißel, für weiche bis harte Formationen, oder Diamantmeißel, für harte bis sehr harte Formationen zum Einsatz. Die Rollenmeißel unterscheiden sich durch Form und Abstand der Meißelzähne, sowie dem Offset, dies ist die Verschiebung der Meißelachsen zueinander. Für weiche Formationen kommen spitze Zähne, die in einem verhältnismäßig großem Abstand zueinander angeordnet sind, und ein großes Offset zum Einsatz. Mit steigender Härte der Formation werden die Zähne stumpfer und enger beieinander liegend ausgebildet, das Offset wird ebenfalls kleiner. Mit Rollenmeißeln sind etwa im Granit Bohrleistungen von 1 - 2 m pro Stunde möglich, jedoch ist zu beachten, dass Rollenmeißel eine vergleichsweise geringe Standzeit zwischen 60 und 120 m haben [24]. Die eingesetzten Diamantmeißel werden als Oberflächenbesetzte-, PDC- und Imprägnierte Meißel ausgebildet. Diese Meißelformen unterscheiden sich durch die Härte des Matrixmaterials, in welches die Diamanten eingebettet sind, sowie ob es sich um industriell gefertigte oder natürliche Diamanten handelt. Die tiefsten Rotarybohrungen wurden bis in Teufen von >100 m niedergebracht.

1.2 Dreh-schlagendes Bohren

Bei den dreh-schlagenden Bohrungen handelt es sich um Hammerbohrungen, diese lassen sich weiter in folgende Verfahren unterteilen:

- Außenhammerbohrung mit Luftantrieb
- Außenhammerbohrung mit Hydraulikantrieb
- Imlochhammerbohrung mit Luftantrieb
- Imlochhammerbohrung mit Wasserantrieb (Wassara Imlochhammer).

1.2.1 Außenhammerbohrung

Diese Verfahren eignen sich nur für Bohrungen mit Längen bis etwa 70 m. Dies ist durch den Umstand begründet, dass der Schlagimpuls von einem an der Bohrlafette angeordneten Außenhammer erzeugt und über die gesamte Länge des Bohrgestänges zum Meißel geleitet werden muss. Bei der Übertragung des Schlagimpulses kommt es zu großen Leistungsverlusten, da die Schlagenergie an den Gestängeverbindungen aufgrund von Querschnittsänderungen reflektiert und in Wärme umgewandelt wird. Des Weiteren werden durch die Kraftübertragung über das Gestänge viel größere Abweichungen generiert als etwa mit Imlochhämmern.

1.2.2 Imlochhammerbohrung

Imlochhämmer sind Bohrhämmer, die im Bohrlochtiefsten direkt hinter dem Meißel angeordnet sind. Bei Imlochhämmern wird zwischen dem Antrieb mit Luft und dem mit Wasser unterschieden. Diese Medien werden dem DTH-Hammer über das Bohrgestänge zugeführt. Eine genaue Beschreibung dieser Verfahren ist in Abschnitt 1 Kapitel 2.17 zu finden.

1.2.3 Vergleich Imlochhammer mit Luft und Imlochhammer mit Wasser

2010 wurden bei der Bohrung von 30 Geothermiebohrungen, mit einem Durchmesser von 115 mm, die beiden derzeit am Markt vorhandenen Imlochhämmerverfahren verglichen. Gebohrt wurden hierfür jeweils 15 Bohrlöcher mit einem Wassara Imlochhammer und 15 Bohrlöcher mit einem luftbetriebenen Imlochhammer von Atlas Copco. Die zu bohrenden Tiefen lagen zwischen 220 und 250 m. Aus geologischer Sicht befanden sich die Bohrungen in kristallinem Fels. Der Hauptfokus des Vergleichs der beiden Verfahren lag auf der Bohrgeschwindigkeit, der absoluten Abweichung der Bohrlöcher, sowie dem Energieverbrauch für die zum Betrieb notwendigen Kompressoren und Pumpen.

In Abbildung 1.3 ist ersichtlich, dass die Bohrgeschwindigkeit der beiden Verfahren asymptotisch zu einer durchschnittlichen Geschwindigkeit hin abnimmt.

In einer Teufe von 190 m wurde bei den Bohrungen Wasser angetroffen. Am Verlauf der Bohrung mit dem Lufthammer ist ersichtlich, dass die Bohrgeschwindigkeit in dieser Teufe drastisch abnimmt. Die durchschnittlichen Bohrgeschwindigkeiten, die mit diesen beiden Verfahren erzielt wurden, betragen für den luftbetriebenen Imlochhammer 0,69 m/s und für den Wasserhammer 0,52 m/s [97].

Die Qualität der Bohrlöcher, die in diesem Fall nur in Form der Abweichung der Bohrlöcher von der vertikalen Achse gemessen wurde, zeigt, dass sich der wasserbetriebene Imlochhammer besser für richtungstreue Bohrungen eignet (siehe Abbildung 1.4).

Die Abweichungen der Bohrungen, die mit dem Wassara Imlochhammer abgeteuft wurden, lagen unter 10%. Dies ist gleichbedeutend mit maximalen Abweichungen zwischen 10 - 20 m,

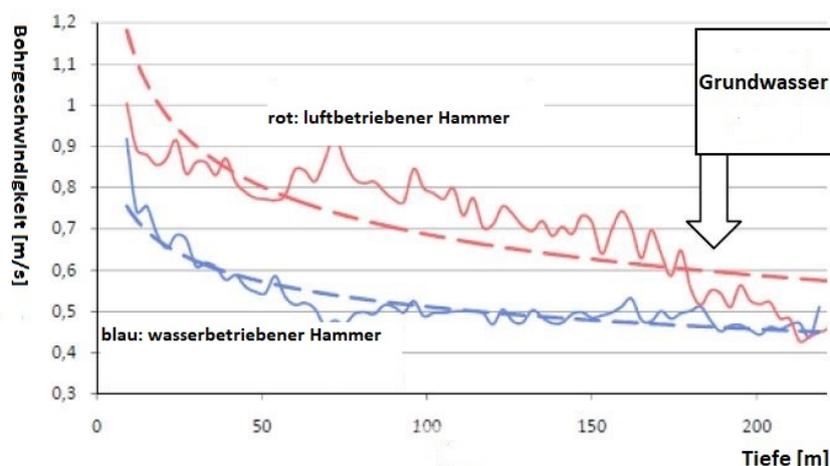


Abb. 1.3: Vergleich der Bohrgeschwindigkeit von luft- und wasserbetriebenen Imlochhämmern nach: [97]

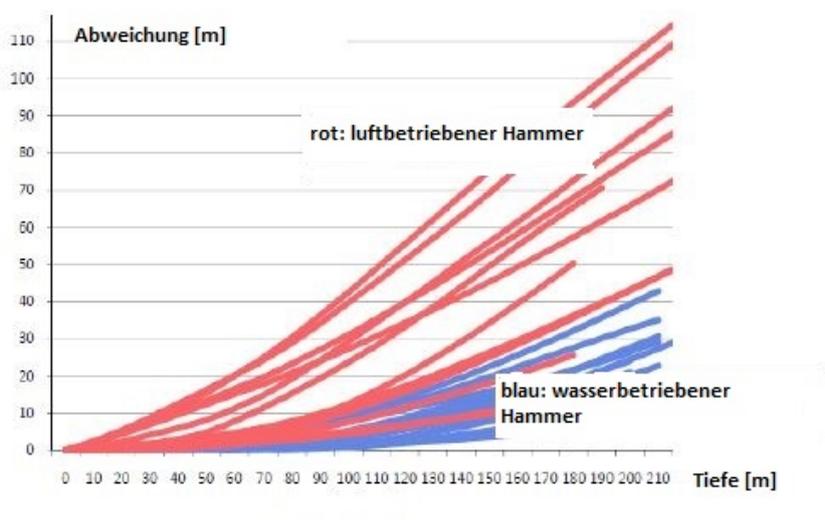


Abb. 1.4: Vergleich der Bohrlochabweichungen von luft- und wasserbetriebenen Imlochhämmern nach: [97]

während mit dem luftbetriebenen Imlochhammer Abweichungen von 35% erzeugt wurden. Die größten Abweichungen mit diesem System betragen 110 m bei einer Bohrlänge von 220 m.

Der große Unterschied in den erreichten Abweichungen lässt sich dadurch erklären, dass der Wasserhammer einen geringeren Ringspalt zur Förderung der Cuttings benötigt, da diese im Vergleich zum luftbetriebenen Hammer kleiner sind. Dies ist durch die größeren Spülungsdrücke bei wasserbetriebenen Hammerbohrungen bedingt [97].

Ein weiterer Faktor der beiden Imlochhämmer, der betrachtet wurde, war der Energieverbrauch der Systeme. Verglichen wurde der Dieserverbrauch, der für den Betrieb der Kompressoren und der Pumpe nötig war. Abbildung 1.5 verdeutlicht, dass der mit Luft betriebene Imlochhammer zirka vier mal so viel Diesel wie der Wasserhammer benötigt [97].

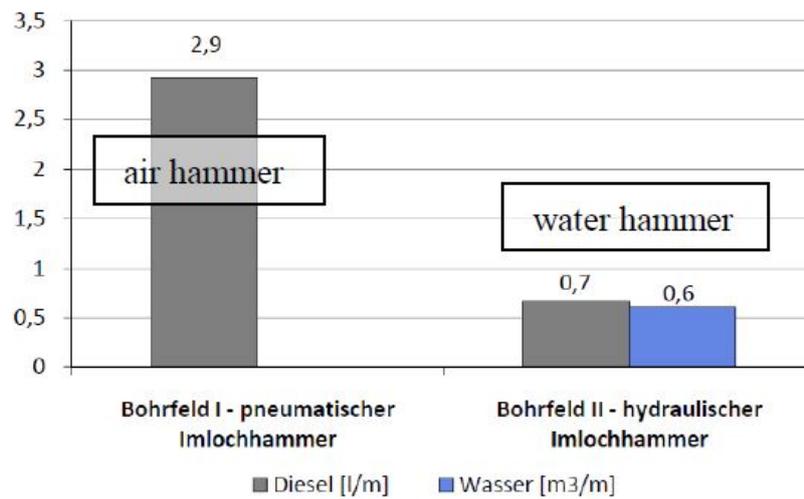


Abb. 1.5: Vergleich des Energieverbrauchs von luft- und wasserbetriebenen Imlochhämmern [97]

Kapitel 2

Gesteuertes Bohren

Gesteuerte Bohrverfahren sind Verfahren, deren Verlauf während des gesamten Bohrvorgangs geändert werden kann. Hierfür ist es notwendig, den Verlauf der Bohrung je nach Verfahren kontinuierlich oder diskontinuierlich zu überwachen. Die verschiedenen Vermessungssysteme wurden bereits in Abschnitt 1 Kapitel 3 erläutert. Im Fall einer zu großen Abweichung kann der Verlauf der Bohrung durch die unterschiedlichen verfahrensspezifischen Steuereinheiten korrigiert und dem in der Planung festgelegten Verlauf wieder angepasst werden.

Die Standfestigkeit des Bohrlochs ist sehr wichtig für die Funktionsweise von gesteuerten Bohrungen. Kommt es zu Ausbrüchen der Bohrlochwand oder Kaliberaufweitungen, so ist es nicht mehr möglich, dass sich die Lenksysteme von der Bohrlochwand wegdrücken und die außermittige Ablenkung erzielt wird. Faktoren, die die Stabilität des Bohrlochs beeinflussen, sind nach [4]:

- Konsolidierungsgrad: Hier wird zwischen losen Sedimenten, konsolidierten Sedimenten und massivem Fels unterschieden,
- Zerlegung-, Zerklüftungs-, Störungsgrad und Grad der Brüchigkeit: Hier kann zwischen losem Bruchgestein, gebrochenem und massivem Fels unterschieden werden,
- Grad der Verwitterung: Hier wird zwischen zersetztem, verwittertem und frischem Fels unterschieden.

2.1 Gesteuerte Kernbohrung

Hierbei handelt es sich um ein Verfahren, das in den vergangenen Jahren immer mehr Anwendungen fand. Durch diese Technik wurde die Möglichkeit geschaffen, Kernbohrungen entlang eines definierten Pfades abzuteufen. Vorallem bei der geologischen Erkundung von Tunnelbauwerken wird diese Technik eingesetzt, um detaillierte Aufschlüsse über die den Tunnel umgebenden Bereiche zu gewinnen. Hierfür werden gesteuerte Kernbohrungen oft von der Oberfläche aus abgeteuft. Durch gezielte Steuerungsmaßnahmen nähern sich diese Bohrungen dem horizontalen Verlauf der Tunnelachse an und verlaufen schließlich parallel zu diesem. Der Einsatz dieser Technologie macht es möglich, im Vergleich zu herkömmlichen Aufschlussmethoden, mit denen nur punktuelle Informationen gewonnen werden, durchgehende Informationen zur geologischen Beschaffenheit des Gebirges zu erlangen. Ein Vergleich, der Aufschlussstrecken von gesteuerten und herkömmlichen Kernbohrungen ist in Abbildung 2.1 dargestellt [27].

Die Technologie des Directional Core Drillings wurde von der norwegischen Firma Devico AS entwickelt. Zum Einsatz kommt hierfür ein steuerbares Seilkernrohr. Dieses System verbindet die Vorteile des MUD-Motors mit jenen des Seilkernrohrs (siehe Kapitel 2.4 und Teil 1 Kapitel 2.3) [26]. Die steuerbaren Seilkernrohre bestehen aus einer Antriebswelle, die durch eine zur Längsachse des Bohrstranges versetzte Lagerbuchse läuft. Um die Seilkernrohre während eines Steuervorganges stabil in ihrer Position zu halten, sind diese mit seitlichen Packern ausgestattet.

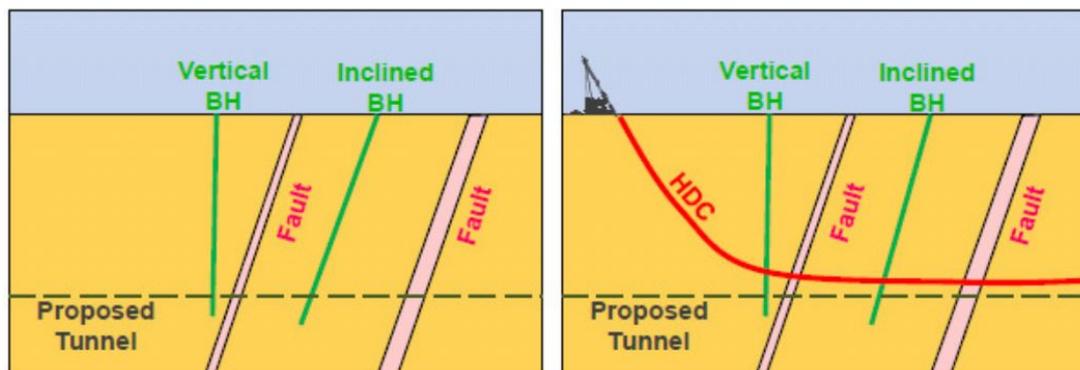


Abb. 2.1: Vergleich der Aussagekraft von vertikalen und horizontalen Bohrungen aus: [27]

Diese werden vor jedem Steuervorgang durch die Änderung des Bohrwasserspülungsdrucks aufgeblasen und sichern somit die Lage des Seilkernrohrs [29]. Ist das Seilkernrohr durch die Packer fixiert, so ist lediglich eine Vorwärtsbewegung des Bohrstrangs, jedoch keine Rotation mehr möglich [26]. Das steuerbare Kernrohr ist mit seinen wichtigsten Komponenten in Abbildung 2.2 abgebildet. Die Richtung des Bohrverlaufs wird durch die Stellung des Toolfaces (gibt die Richtung der Bohrung vor) sowie der des Knickwinkels (beeinflusst den Krümmungsverlauf der Bohrung) vorgegeben [27].

Die Vermessung erfolgt mit Hilfe eines elektronischen Multishot Geräts (EMS), in festgelegten Intervallen. Das EMS erfasst den Azimut sowie die Neigung des Bohrlochs in unterschiedlichen Tiefen, dadurch kann auf die Lage der Bohrung rückgeschlossen werden. Nach jeder Messung wird der Verlauf neu berechnet und überprüft, ob sich die Bohrung noch in ihrem Toleranzbereich befindet. Ist dies nicht gegeben, so wird der Verlauf der Bohrung durch das aktive Steuern korrigiert [27].

Mit dieser Technik werden Bohrungen in vielen Fällen von der Oberfläche aus gestartet, durch das gezielte Ablenken der Bohrung aus der Vertikalen nähert sich diese stetig dem Verlauf der geplanten Tunnelachse an. Dies wird durch eine langsame Änderung der Bohrriehtung erreicht. Die mit diesem Verfahren mögliche Änderungsrate beträgt etwa 9 Grad pro 30 m [29].

Der Außendurchmesser von steuerbaren Seilkernrohren beträgt 75,6 mm während die erbohrten Kerne lediglich einen Durchmesser von 32 mm aufweisen. Aufgrund des im Vergleich zu anderen Kernbohrsystemen sehr großen Schnittbereichs ist die mit diesem System erzielbare Bohrgeschwindigkeit gering. Ein Nachteil der mit diesem System gewonnenen Bohrkerne ist, dass aufgrund ihres geringen Durchmessers während des Bohrens große Störungen am Kern entstehen. In stark bis mäßig zersetzten Gesteinsmassen werden die erbohrten Kerne oft beschädigt, da blockierende Teile den Kern abschleifen. Infolgedessen ist die Kerngewinnung mit diesem Verfahren im Vergleich zu anderen Kernrohr-Systemen relativ gering [26].

Durch den Einsatz eines gesteuerten Systems ist es möglich, die Genauigkeit einer Bohrung deutlich zu erhöhen. Bohrlöcher sind immer von einer natürlichen Abweichung beeinflusst. Die unterschiedlichen Gründe für derartige Abweichungen wurden in Teil 1 Abschnitt 2.4.1 beschrieben. Durch den Einsatz von gesteuerten Bohrtechniken kann ein Bohrloch in eine beliebige Richtung gesteuert und auf den in der Planung festgelegten Verlauf zurückgebracht werden [29].

Die meisten Bohrungen treffen ihr Ziel mit einer einzigen Richtungskorrektur, bei extrem tiefen Bohrungen oder in Bereichen in denen es zu hohen natürlichen Abweichungen kommt, kann es notwendig sein, mehrere Richtungskorrekturen vorzunehmen. Die tolerierbaren Abweichungen von Bohrungen werden von den Projektgeologen festgelegt und können von Projekt zu Projekt

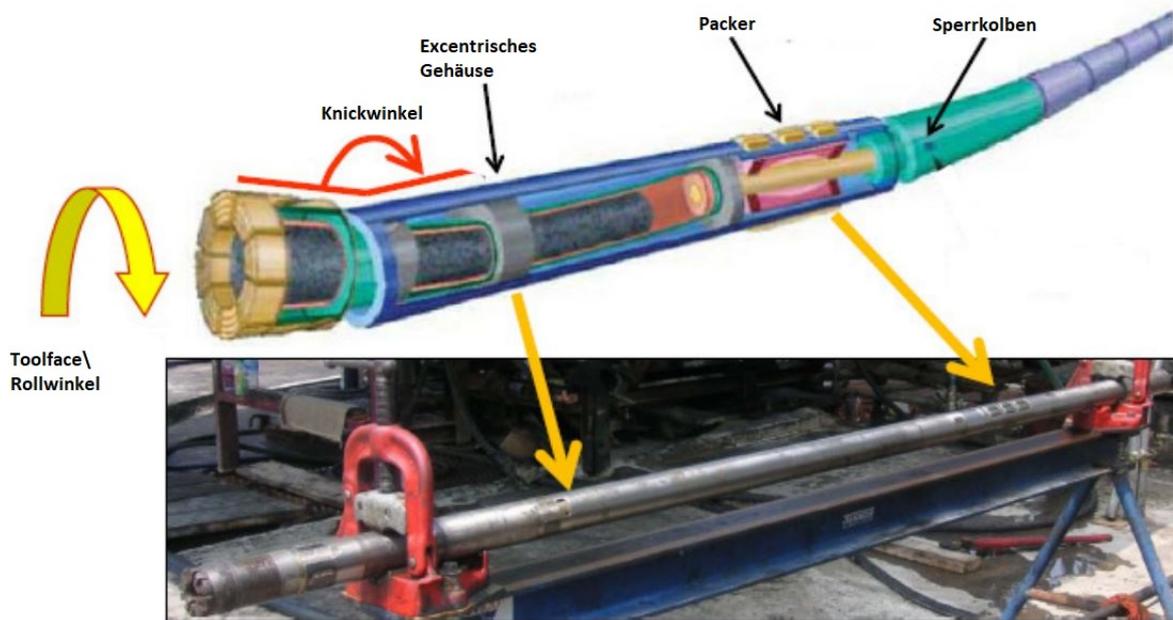


Abb. 2.2: Komponenten gesteuertes Kernbohrsystem aus: [27]

variieren. Die häufigsten Grenzen bei Projekten, bei denen, gesteuerte Seilkernbohrungen zum Einsatz kamen, sind:

Tab. 2.1: Zulässige Abweichung von gesteuerten Seilkernbohrungen nach: [29]

Tiefe	max. Radius
500 - 1000 m	5 - 15 m
> 1000 m	10 - 25 m

In der Kittilä Miene in Finnland wurden von der Firma Agnico-Eagle Bohrungen bis in eine Tiefe von 1200 m abgebohrt. Diese Bohrungen konnten mit einer Abweichung von lediglich 20 - 30 m gebohrt werden. Dies entspricht einer prozentuellen Abweichung von 2,1% [29].

Die Bohrgeschwindigkeiten, die mit diesem Verfahren erreicht werden können, liegen laut Herstellerangaben in weichen Formationen bei 6,0 - 8,4 m/h und in harten Formationen bei 3,6 - 6,0 m/h [29].

In Singapur wurde zur geologischen Erkundung einer Tunnelbaustelle eine 1193 m lange Bohrung mit diesem Verfahren abgeteuft. Vom Auftraggeber des Projekts wurde eine maximal zulässige Abweichung von 5,0 m definiert, dies ist gleichbedeutend mit einer Abweichung von 0,42%. Die Bohrung wurde mit einem Winkel von 27° zur Horizontalen gestartet und in den geplanten horizontalen Verlauf abgelenkt. Bei diesen Arbeiten wurden Bohrgeschwindigkeiten von ungefähr 0,4 m/h inklusive aller notwendigen Arbeiten, wie etwa der Vermessung, erreicht. Der Verlauf der Bohrung sowie der geforderte Korridor sind in Abbildung 2.3 dargestellt [16].

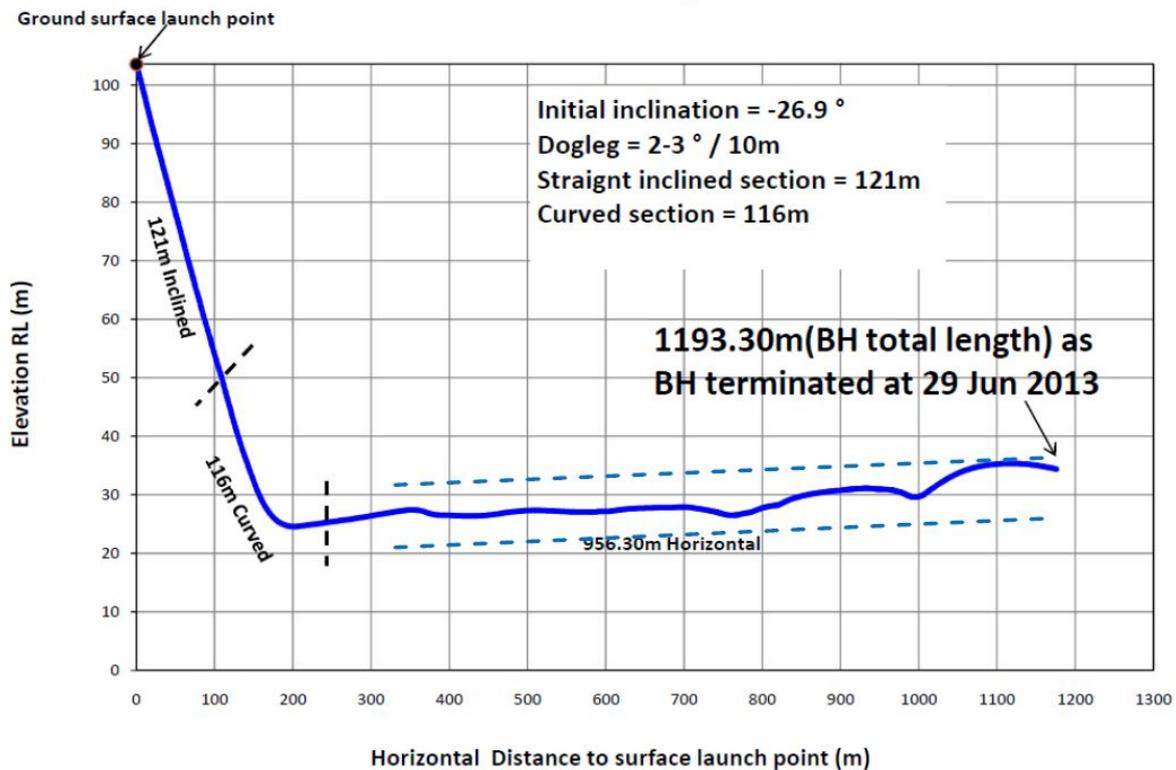


Abb. 2.3: Bohrverlauf gesteuerte Seilkernbohrung Singapur [16]

2.2 Gesteuerte Imlochhammerbohrung

Gesteuerte Imlochhammerbohrungen sind ein relativ junges Verfahren, weil es große Schwierigkeiten mit sich bringt, die Vermessungssonde fix im Bohrstrang anzuordnen, da diese vor den Beschleunigungskräften des Hammers geschützt werden muss. Des Weiteren können mit Systemen, die mit Luft betrieben werden keine Bohrungen, die länger als 80 m sind, hergestellt werden, da der Austrag der Cuttings aus den bogenförmigen Bohrlöchern Probleme mit sich bringt. Aufgrund der großen Rückstellkräfte ist eine entsprechende Verankerung der Bohrgeräte am Bohrplatz dringend notwendig [8].

Durch den Einsatz von mit Wasser betriebenen Systemen und die Vermessung mit Hilfe von Sonden, die nicht fix im Bohrstrang angeordnet sind, bieten diese System gute Alternativen zu den herkömmlichen Systemen.

2.2.1 Gesteuerte Imlochhammerbohrung mit Bentsub

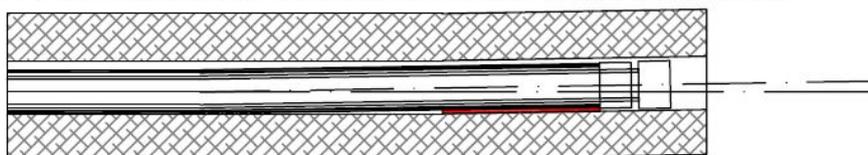
Dieses Verfahren wurde von der Firma Züblin Spezialtiefbau Ges.m.b.H entwickelt. Eingesetzt wird ein Wassara Imlochhammer im Schutz einer Außenverrohrung. In dieser Außenverrohrung ist ein Bentsub angeordnet, hierbei handelt es sich um ein Knickstück, mit dessen Hilfe eine Ablenkung der Bohrung erzielt werden kann. Hierfür wird die Rotation der Außenverrohrung gestoppt, der Knick in die Richtung der gewünschten Ablenkung ausgerichtet und nur mehr mit dem Hammer weitergebohrt. Die Außenverrohrung wird während des Steuervorgangs lediglich dem vorseilenden Meißel des Imlochhammers nachgeschoben. Für gerade Bohrstrecken erfolgt eine gegengleiche Rotation des Innengestänges und der Außenverrohrung. Dadurch wird der

Exzentrizität, die durch das Knickstück entsteht entgegengewirkt. Versuche haben ergeben, dass dieses System nur in standfesten Formationen eingesetzt werden kann. Vermessen werden diese Bohrungen mit Hilfe der in Teil 1 Kapitel 3.2.7 beschriebenen Messsonde. Hierfür muss der Bohrvorgang für die Dauer der Vermessung unterbrochen werden und die Verrohrung sowie das Innengestänge von der Drehvorrichtung gelöst werden. Im Anschluss daran wird die Messsonde über das Bohrgestänge ins Bohrlochtiefe geführt.

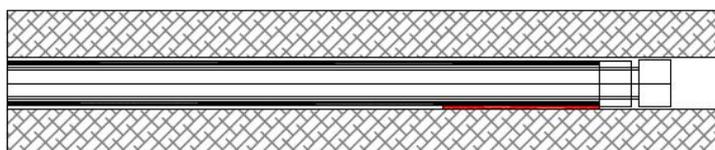
2.2.2 Gesteuerte Imlochhammerbohrung mit Ablenkleisten

Dieses System wurde ebenfalls von der Firma Züblin Spezialtiefbau Ges.m.b.H entwickelt. Bei diesem Verfahren kommt wie bei der der Bohrung mit Bentsub ein Wassara Imlochhammer im Schutz einer Außenverrohrung zum Einsatz. Die Steuerung dieses Bohrsystems erfolgt so, dass während des Steuervorgangs die Rotation der Außenverrohrung gestoppt wird, während der Bohrhammer sowohl drehend wie auch schlagend weiter arbeitet und die Außenverrohrung nachgeschoben wird.

Steuervorgang im standfesten Gebirge. Rotationsstopp der Außenverrohrung. Dadurch drücken sich die Ablenkleisten von der Bohrlochwand weg. Dadurch wird der Bohrkopf außermittig abgelenkt und es kann gesteuert werden.



Zum Geradeausbohren drehen sich so wohl die Verrohrung als auch das Innengestänge, dadurch wird der gesamte Querschnitt (152 mm) freigeschnitten und es kommt zu keiner Ablenkung.



Steuervorgang im nicht standfesten Gebirge. Aufgrund der Instabilitäten des Bohrlochs können sich die Ablenkleisten nicht von der Bohrlochwand wegdrücken, sondern versinken in dieser. Daher ist kein Lenken möglich und die Bohrung verläuft tendenziell nach unten, da es zu weiteren Setzungen im Bohrloch kommt.

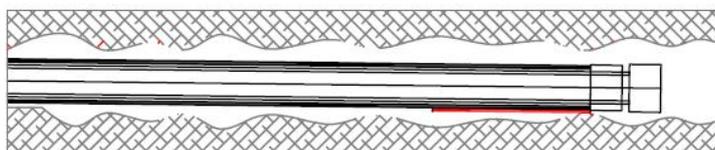


Abb. 2.4: Steuern einer Bohrung mit Ablenkleisten

Mit Hilfe der Ablenkleisten, hierbei handelt es sich um ca. 2 cm breite verschleißfeste Stahlbleche, die mit einer Länge von etwa 0,5 m auf einer Seite der Außenverrohrung direkt hinter der Bohrkronen angeschweißt sind, wird eine außermittige Ablenkung der Bohrung erzielt. Der Bohrmeißel wird durch diese von seinem ursprünglich geraden Verlauf in die gewünschte Richtung abgelenkt. Die unterschiedlichen Prozesse dieses Systems sind in Abbildung 2.4 dargestellt.

Um die Bohrung erfolgreich steuern zu können, ist eine stabile Bohrlochwand unerlässlich, da sich die aufgeschweißten Ablenkleisten an dieser abstützen müssen, um den Bohrstrang erfolgreich von seinem Verlauf abzulenken. Instabilitäten des Bohrlochs können auf einer Länge von bis zu 0,20 m überbrückt werden, jedoch ist zu beachten, dass in solch einem Fall die gewünschte Ablenkung vom ursprünglichen Verlauf bei weitem nicht so schnell herbeigeführt werden kann. Grundsätzlich gilt, dass für jede Richtungskorrektur der Steuerungsprozess über eine gewisse Länge ausgeführt werden muss. Diese Länge steht in direktem Zusammenhang mit der Beschaffenheit des Bohrlochs. Umso stabiler die Bohrlochwand ist, desto kürzer fällt die benötigte Strecke aus, sie beträgt jedoch mindestens 1,0 m, um den gesamten Bohrstrang in die gewünschte Richtung lenken zu können. Die Vermessung erfolgt wie in Kapitel 2.2.1 mit Hilfe des Drill-Pilot®.

2.3 Gesteuerte Bohrungen mit Rollenmeißel

Im folgenden Kapitel werden die gesteuerten Bohrverfahren mit Rollenmeißel beschrieben. Hierbei handelt es sich um Verfahren bei denen die Steuerung ohne den Einsatz eines MUD-Motors erfolgt.

2.3.1 UNI Drill System von DMT

Dieses System eignet sich vor allem für Mischböden, in denen die übrigen Verfahren schnell an ihre Grenzen stoßen. Zum Schutz des Innengestänges und zur Sicherung des Bohrlochs vor Verstürzen kommt eine Außenverrohrung zum Einsatz. Mit Hilfe dieser Außenverrohrung erfolgt die mechanische Steuerung des Bohrlochverlaufs. Die Steuerung der Bohrung wird dadurch ermöglicht, dass das Innengestänge in den letzten Metern der Außenverrohrung exzentrisch gelagert ist, dadurch ergibt sich ein einseitiger Überschchnitt (siehe Abbildung 2.5).

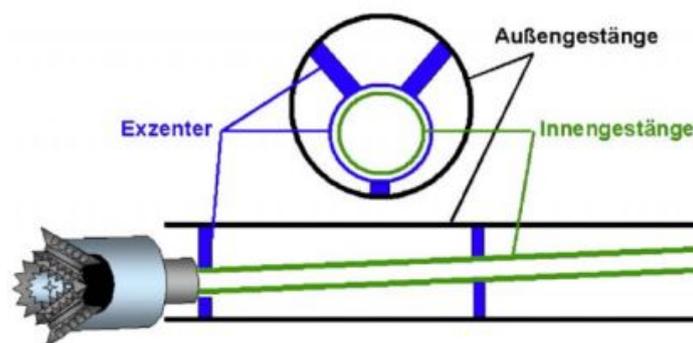


Abb. 2.5: Exzentrische Lagerung des Innengestänges [36]

Durch die Drehung der Außenverrohrung wird dieser Exzentrizität entgegengewirkt und es kann ein gerader Verlauf erbohrt werden. Zum Steuern der Bohrung, wird die Außenverrohrung so ausgerichtet, dass der gewünschte Überschchnitt in die zu bohrende Richtung weist. Es wird nur mehr mit dem drehenden Innengestänge weitergebohrt. Die Außenverrohrung wird dabei ohne Rotation mitgeschoben. Zur Verlaufsmessung der Bohrung sind Neigungs- und Richtungsmessgeräte sowie ein System zur Datenübertragung, in schmalen Kammern an der Außenverrohrung, angeordnet [36].

2.3.2 Tracto Technik

Dieses System wird vor allem in stark zersetzten und inhomogenen Formationen eingesetzt, da die Bohrungen im Schutz einer Außenverrohrung abgeteuft werden und das Innengestänge, an dem das Bohrwerkzeug befestigt ist, vor Bohrlochverstürzen geschützt wird [10]. Bei diesem Verfahren erfolgt die Steuerung der Bohrung durch einen asymmetrischen angesetzten Bohrkopf, der durch die Außenverrohrung gesteuert wird. Der Bohrmeißel wird durch das Innengestänge angetrieben. Um die Reibung zwischen Gestänge und Verrohrung zu reduzieren, ist das Innengestänge an Lagerpunkten gehalten. Die Grenzen dieses Verfahrens werden einerseits von der Druckfestigkeit des Gesteins (max. 330-350 MPa) sowie der Länge der Bohrung bestimmt [8].

2.3.3 Drilljet

Bei diesem Verfahren erfolgt die Steuerung mit Hilfe eines Knickstücks, das in einem Sondengehäuse, im Innengestänge direkt hinter dem Rollenmeißel angeordnet ist. Neben dem Knickstück befinden sich in dem Sondengehäuse auch noch das Lagerpaket und die Antriebswelle. Die aufgezeichneten Daten werden von der Sonde an die Oberfläche gesendet, wo sie mit Hilfe eines Ortungsgeräts empfangen und an die Bohranlage übertragen werden. Zur Steuerung wird das Knickstück durch das Innengestänge in die gewünschte Position gebracht und durch die Unterbrechung der Rotation der Außenverrohrung in dieser Position gehalten. Im Anschluss daran lässt man den Rollenmeißel rotieren und es findet eine Ablenkung in die gewünschte Richtung statt. Durch den Knick im Gestänge ergibt sich eine außermittige Bohrachse wodurch ein kontrolliertes Ablenken der Bohrung möglich ist. Um ohne Steuern zu bohren, werden die Verrohrung und das Gestänge gedreht. Dies hat eine gerade Bohrlinie zur Folge, da durch die Rotation beider Gestänge, die durch das Knickstück entstehende Exzentrizität ausgeglichen wird [32].

2.4 Mudmotorbohrungen

Dieses Verfahren wurde aus der Tiefbohrtechnik, wo es bereits seit 1966 im Einsatz ist, übernommen und an die Bedürfnisse des Spezialtiefbaus angepasst. Vorwiegend werden MUD-Motoren in der HDD Technik eingesetzt [20]. MUD-Motoren, auch Bohrlochmotoren genannt, kommen bei verlaufsgesteuerten Felsbohrungen zum Einsatz. Mit diesem System können alle Gesteinstypen durchbohrt werden. Es ist aber zwingend notwendig das Bohrwerkzeug auf das anstehende Gestein abzustimmen [8].

Bei MUD-Motoren handelt es sich um Schraubenmotoren, die durch die Bohrspülung, welche diesem unter hohem Druck über das Gestänge zugeführt wird, angetrieben werden. Der Antrieb erfolgt nach dem Prinzip von Schraubepumpen. Dabei fördert der Rotor, eine schraubenförmige Stange aus Stahl, die Bohrspülung durch den Stator. Hierbei handelt es sich um ein längliches Gehäuse, welches mit Elastomer ausgekleidet ist. Der Stator besitzt eine gegenförmige Schraubenkontur, welche im Vergleich zum Rotor um einen Gang höher ist [20]. Aufgrund dieser Formgebung entstehen entlang der Längsachse des Bohrlochmotors kleine voneinander getrennte Kammern, die die Bohrspülung durch den Motor fördern und das System antreiben. Die Kammern werden durch eine Übermaßpassung voneinander getrennt, welche sich zwischen dem Rotor und dem Stator befindet. Dadurch kann die Spülung nur durch den Motor fließen, wenn sich dieser in Bewegung befindet [18]. Wird der Bohrlochmotor mit einer Bohrspülung beaufschlagt, so setzt sich der Rotor in Bewegung und die Kammern bewegen sich von oben nach unten durch das System. Die Bohrspülung wird durch den Bohrlochmotor geleitet. Durch verschiedene konstruktive Ausführungen ist es möglich, die Bohrlochmotoren an die verschiedenen Einsatzgebiete anzupassen. Bei Bohrlochmotoren herrscht ein direkter Zusammenhang

zwischen dem eingebrachten Spülstrom und der Drehzahl des Systems. Einen weiteren direkten Zusammenhang gibt es zwischen dem betrieblichen Differenzdruck am MUD-Motor und dem Drehmoment am Abbauwerkzeug. Dadurch ist es möglich, die gegenwärtige Drehzahl und das Drehmoment des Bohrmeißels anhand des Spülungsdrucks und des Spülstroms zu bestimmen [9].

Der große Vorteil der MUD-Motortechnologie ist, dass die zum Antrieb des Bohrmeißels notwendige Rotationsenergie im Bohrlochtiefsten erzeugt wird und nicht wie bei normalen Rotarybohrungen über das Bohrgestänge dort hin geleitet wird. Durch die Erzeugung der Rotationsenergie im Bohrlochtiefsten können die Reibungsverluste, die durch die Drehung des Bohrgestänges bedingt sind, ausgeschaltet werden. Der MUD-Motor erzeugt die zum Antrieb des Bohrwerkzeugs notwendige mechanische Energie durch die Umwandlung von hydraulischer Energie, die in Form von Spüldurchfluss und -druck ins Bohrlochtiefste eingebracht wird. Diese Umwandlung erfolgt ohne eine Rotation des Bohrstrangs, so ist es möglich den Verschleiß des Bohrgestänges zu minimieren [9].

Dadurch, dass der Rotor die Kräfte der Drehbewegung über eine Gelenkwelle überträgt, kann der zur Steuerung dieses Verfahrens notwendige Knick in der Längsachse des MUD-Motors angeordnet werden. Durch diesen Knick wird die Exzentrizität des Bohrstranges erzeugt. Diese Knickstücke sind in den meisten Fällen verstellbar und die Winkel der Knicke liegen zwischen $0,5^\circ$ und $3,0^\circ$ [9].

2.4.1 Konstruktiver Aufbau von Bohrlochmotoren

In den folgenden Kapiteln werden die wichtigsten Bauteile von MUD-Motoren beschrieben. Diese sind:

- der Antriebsteil
- die Biege- und Gelenkwelle
- der einstellbare Knick
- der Lagerstuhl

Der Aufbau eines MUD-Motors ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

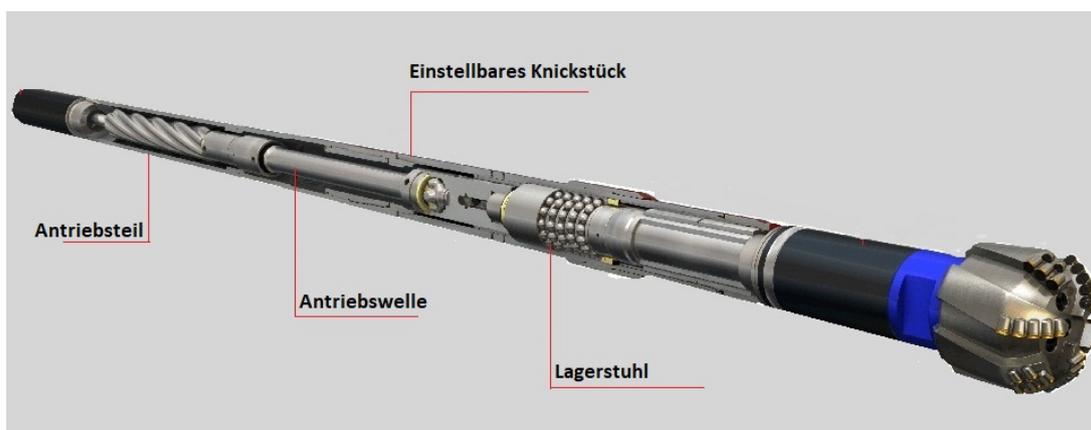


Abb. 2.6: Die wichtigsten Bestandteile eines MUD-Motors nach:[3]

2.4.1.1 Antriebsteil

Der Antriebsteil von MUD-Motoren besteht aus einem Stator und einem inneren Rotor. Zum Schutz vor Verschleiß ist die Außenseite des Rotors mit Chrom beschichtet. Die Innenseite des Stators ist mit einem speziellen Elastomer ausgekleidet. Dieses ist so steif, dass es dem Abrieb und Verschleiß, durch die in der Spülung befindlichen Feststoffe, standhält. Eine weitere Aufgabe, die dieser Auskleidung zukommt, ist die Abdichtung zwischen Rotor und Stator. Die Kontur des Elastomers entspricht der exzentrischen Form des Rotors. Diese Formgebung bedingt, dass sich zwischen Rotor und Stator mehrere durch das Elastomer abgedichtete Kammern ausbilden. Durch diese Kammern wird die Spülung während des Betriebs geleitet und sorgt dadurch für den Antrieb des Bohrlochmotors [68]. Der Stator hat einen Lobe weniger als der Rotor. Als Lobe werden die Ausbuchtungen des Rotors bezeichnet, durch welche die Spülung durch den Antriebsteil geleitet wird [9]. Eine Erhöhung der Anzahl der Lobes führt zu einem erhöhten Drehmoment und einer verringerten Drehzahl [68].

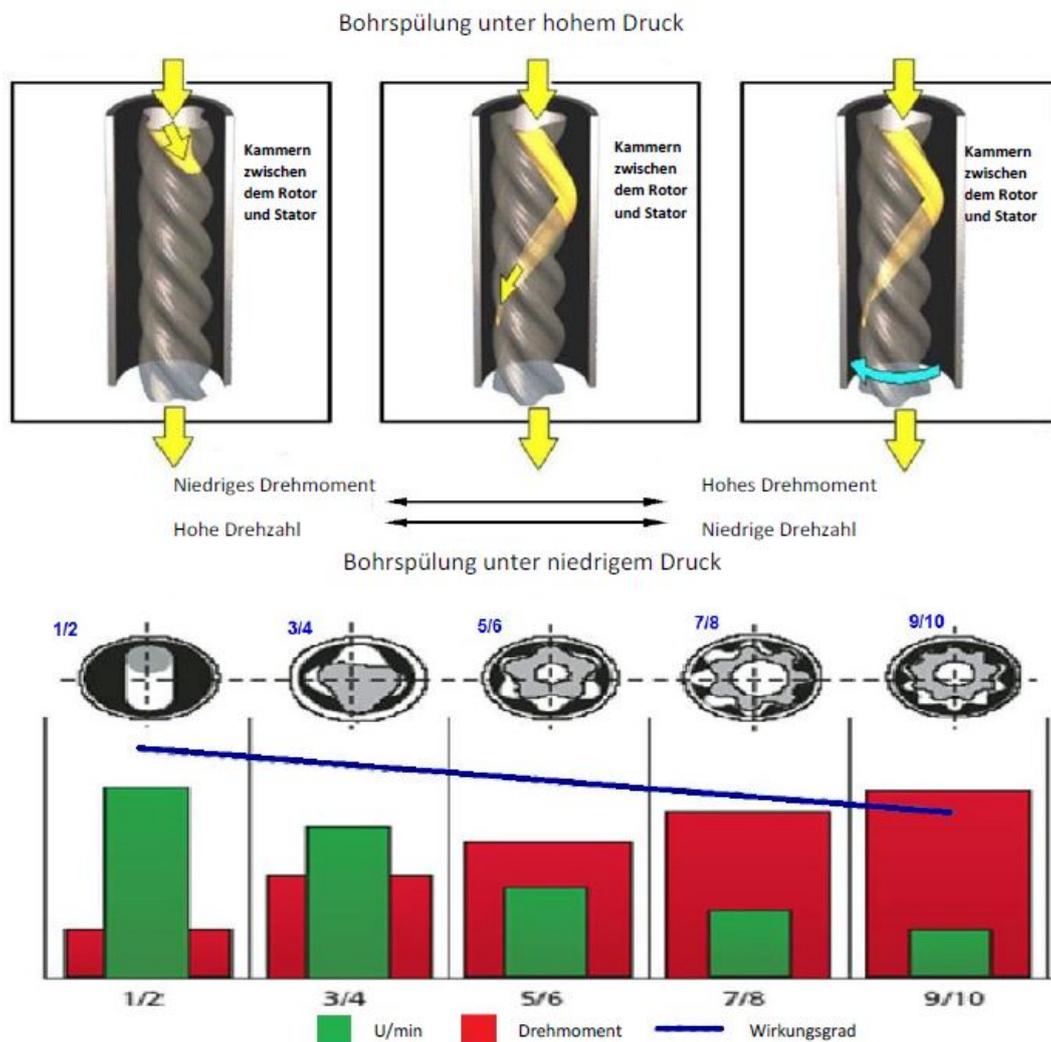


Abb. 2.7: Zusammenhang zwischen Rotationsgeschwindigkeit und Drehmoment nach: [3]

In Abbildung 2.7 ist der Zusammenhang zwischen der Drehzahl und dem Drehmoment von MUD-Motoren sowie ihre Funktionsweise ersichtlich. Im oberen Teil der Abbildung ist zu erkennen,

wie die Bohrflüssigkeit durch das Kammersystem zwischen Rotor und Stator fließt und den Motor dadurch in Bewegung versetzt. Im unteren Teil der Abbildung sind die Zusammenhänge zwischen dem Lobe Mode und der dadurch generierten Drehzahl und dem zugehörigen Drehmoment dargestellt.

2.4.1.2 Biege- und Gelenkwelle

Dieses Bauteil wird verwendet, um die Rotation und das Drehmoment vom Rotor auf die Antriebswelle zu übertragen. Es wird benötigt um die exzentrische Rotation des Rotors im Stator auszugleichen [9].

2.4.1.3 Einstellbares Knickstück

Dieses befindet sich zwischen dem Antriebsteil und dem Lagerstuhl. Es dient dazu den Knickwinkel des MUD-Motors innerhalb der möglichen Grenzen beliebig einzustellen. Diese Grenzen liegen in den meisten Fällen zwischen $0,5^\circ$ und $3,0^\circ$ [68].

2.4.1.4 Lagerstuhl

Dieser Teil des MUD-Motors ist für die zentrische Lagerung der Antriebswelle im Motor verantwortlich, zusätzlich dazu dient er der Aufnahme von radialen und axialen Kräften. Hierzu sind an den Enden der Antriebswelle Radiallager angeordnet. Zwischen diesen Radiallagern ist zusätzlich ein Axiallager situiert [9]. Geschmiert werden diese Lager durch die eingebrachte Bohrspülung [68].

2.4.2 Funktionsweise

Beim Bohren mit MUD-Motoren wird zwischen zwei Verfahrensabschnitten unterschieden, diese sind das Bohren von Kurven und von Geraden. Zum Bohren von Geraden wird nach dem Prinzip des Rotary-Bohrens gebohrt. Das bedeutet, dass der gesamte Bohrstrang mit 60 bis 100 U/min rotiert wird. Die aufgrund der Rotation des Bohrstrangs wirkenden Seitenkräfte auf den Meißel bedingen, dass dieser in allen Richtungen des Bohrlochs gleichmäßig wirkt und somit gradeaus bohrt. Diese Bohrprinzipien sind in Abbildung 2.8 dargestellt.

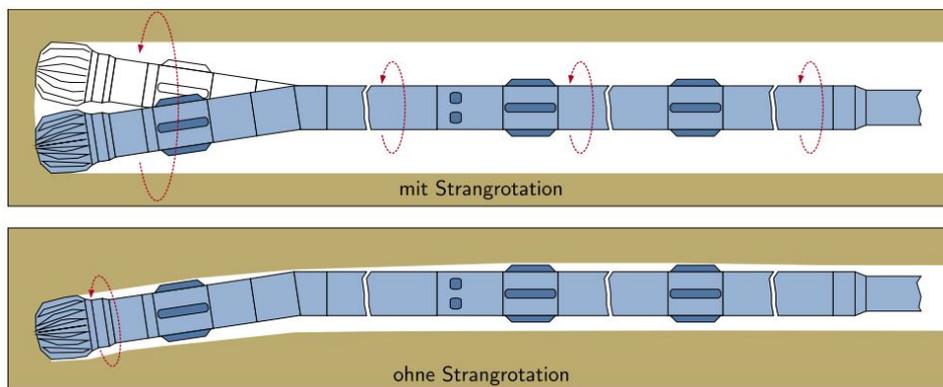


Abb. 2.8: Bohrprinzipien eines MUD- Motors [84]

Zum Bohren von Kurven wird die Rotation des Bohrstranges gestoppt, dadurch weisen der Knick und somit auch der Bohrmeißel immer in die selbe Richtung. Durch die Rotation des

Meißels erfolgt eine kontinuierliche Ablenkung, in die Richtung des Knicks, und es wird eine Kurve erbohrt. Durch die Kombination von Kurven und Tangenten ist es möglich, beliebige Verläufe zu erbohren [9].

Bevor mit einer solchen Bohrung begonnen werden kann, muss der Knickwinkel eingestellt werden. Hierbei ist zu beachten, dass große Winkel engere Kurvenradien zulassen, jedoch zu erhöhten Spannungen im Motor führen, welche seine Lebensdauer stark verringern. Mit kleineren Winkeln sind längere Strecken notwendig, um die Bohrrichtung anzupassen. Diese längeren Steuerstrecken sind mit Leistungseinbußen verbunden, da beim Rotary-Bohren generell höhere Geschwindigkeiten erzielbar sind [9]. Zur Planung der Bohrverläufe gibt es verschiedene Möglichkeiten. Es werden etwa Näherungen über die 3-Punkt Geometrie des Bohrstrangs oder Aufbauraten Diagramme herangezogen.

Die geometrischen Annahmen auf denen diese Näherung basiert sind in Abbildung 2.9 dargestellt. Hierbei handelt es sich um eine praktikable Näherung, die aber ein Fehlerpotential von bis zu 10% bezüglich der erbohrten Radien aufweist. Diese Näherung basiert auf dem Prinzip, dass drei Punkte, die nicht auf einer Geraden liegen nur durch einen Kreis miteinander verbunden werden können. Diese Tatsache wird zur Bestimmung der Aufbaurate des Bohrwerkzeugs genutzt. Zur Berechnung des Bohrradius wird vorausgesetzt, dass sich der Knick im ersten Stabilisator befindet und die Stabilisatoren den selben Durchmesser, wie der Bohrmeißel, aufweisen. Eine weitere Voraussetzung zur Anwendung dieser Näherung ist, dass sich der Bohrstrang nicht verbiegen kann [79].

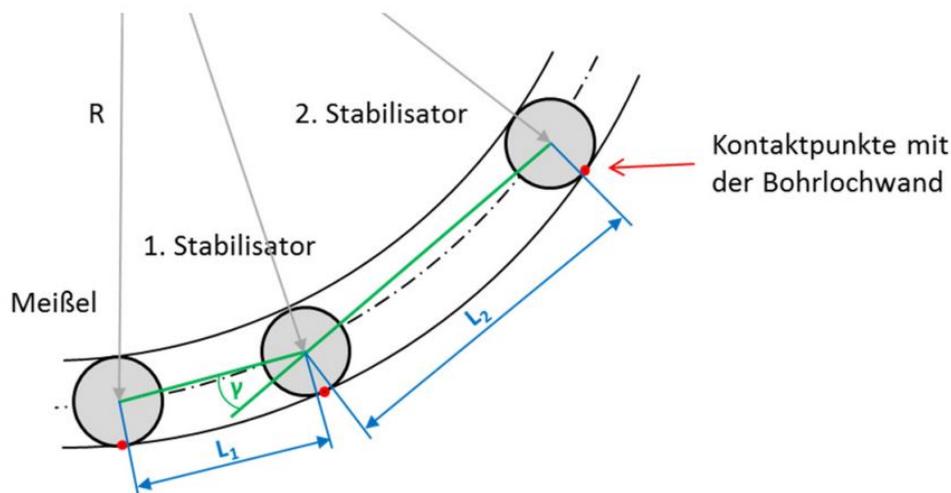


Abb. 2.9: Idealisiertes Modell eines voll stabilisierten MUD-Motors [79]

Aus diesen Bedingungen bilden sich am Meißel sowie den beiden Stabilisatoren Kontaktpunkte mit der Bohrlochwand aus, diese Kontaktpunkte können durch einen Kreis miteinander verbunden werden. Der Radius dieses Kreises entspricht dem Radius der Bohrstrecke, zuzüglich dem halben Durchmesser des Meißels. Durch die Abstände zwischen dem Meißel und dem ersten Stabilisator sowie dem Abstand zwischen den beiden Stabilisatoren und dem Knickwinkel ist es möglich den Bohrradius über nachfolgende Formel näherungsweise zu berechnen: [79]

$$\frac{L_1 + L_2}{2\sin\gamma} \quad (2.1)$$

Auf Grund ihrer einfachen Anwendbarkeit wird auf so genannte Aufbauraten-Diagramme zurückgegriffen. Aus diesen Diagrammen lässt sich die jeweilige Aufbaurate abhängig vom eingestellten Knickwinkel ablesen [9].

Zum Vermessen von MUD-Motorbohrungen gibt es verschiedene Verfahren. In den meisten Fällen wird jedoch auf ein Measurement-While-Drilling (MWD) Verfahren zurückgegriffen. Mit Hilfe derartiger Verfahren ist eine kontinuierliche Übertragung der Daten, bezüglich der Position und Stellung des Toolfaces im Raum, möglich. Die Übertragung der gesammelten Daten erfolgt über ein Wire in line System [71]. Dieses System, bei dem die zur Datenübertragung notwendigen Kabel im Bohrstrang verbaut sind, wurde bereits in Teil 1 Kapitel 3 beschrieben.

Bei der Herstellung von Injektionsbohrungen zur vorauseilenden Sicherung des Vortriebs des Hallandsastunnels in Schweden wurden Bohrungen mit einem MUD-Motor abgeteuft. Der MUD-Motor kam intermittierend mit einem Wassara Imlochhammer (siehe Teil 1 2.1.2.1) zum Einsatz und hatte die Aufgabe, die Lage der Bohrungen zu sichern. Bei diesen Bohrungen wurden Bohrgeschwindigkeiten zwischen 1,2 und 10,2 m/h erzielt. Diese Geschwindigkeiten beziehen sich auf die reine Bohrzeit, ohne das Aufsetzen von Rohren oder anderen Arbeiten, die bei derartigen Bohrungen anfallen [71].

2.5 Rotary Steerable System (RSS)

Dieses Verfahren wurde von Deutsche Montan Technologie GMBH entwickelt. Das Rotary Steerable System ist direkt hinter dem Bohrkopf angeordnet, dadurch ist es möglich, Abweichungen vom Sollverlauf der Bohrung unmittelbar nach ihrer Entstehung zu korrigieren.

Die Hauptbestandteile dieses Systems sind eine innere Welle, die mit dem Meißel und dem Bohrgestänge verbunden ist, sowie eine äußere nichtrotierende Verrohrung, das mit vier radial beweglichen Steuerkufen ausgestattet ist. Im Fall einer Abweichung vom geplanten Verlauf werden die entsprechenden Steuerkufen gegen die Bohrlochwand gedrückt, dies führt zu einer Ablenkung der Bohrung von ihrem Verlauf. Gleichzeitig bewirkt dieses Abdrücken den Stillstand der Außenverrohrung. Hinter diesen Steuerkufen sind die Bestandteile der Steuerungshydraulik, Sensorik sowie die Elektronik angeordnet. Die für den Betrieb der einzelnen Komponenten erforderliche Energie wird entweder mit Hilfe eines Generators oder einer Pumpe erzeugt. Die Energieerzeugung mit Hilfe des Generators erfolgt durch die Nutzung der Relativverschiebung der beiden Gestänge. Der Antrieb der Bohrkronen erfolgt entweder durch das rotierende Innengestänge oder einen Bohrlochmotor [36].

Eine grundlegende Bedingung dafür, dass dieses System eingesetzt werden kann, ist ein standfester Untergrund. Da sich das System für die jeweiligen Lenkvorgänge von einer stabilen Bohrlochwand wegdrücken muss. Aus diesem Grund kann das System in leicht bindigen und bindigen Böden, sowie im Lockergestein nicht eingesetzt werden, in Mischböden ist ein Einsatz nur bedingt möglich [36].

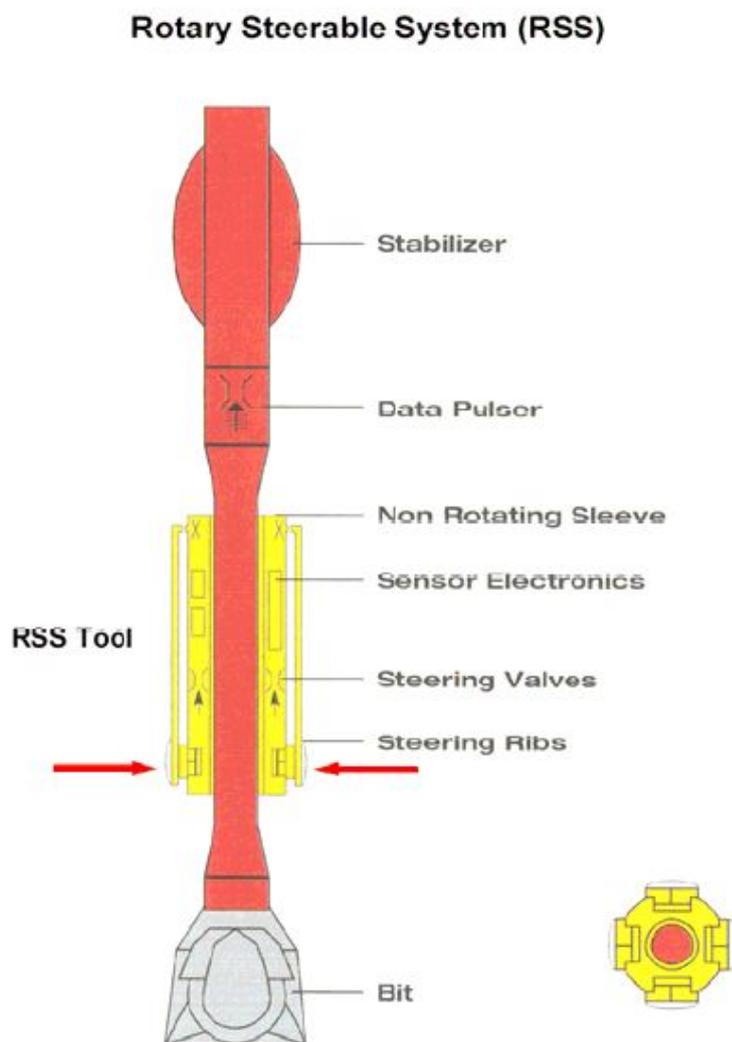


Abb. 2.10: Bohrstrang mit Rotary Steerable System [36]

2.6 Gesteuerte Spülbohrungen

Bei diesen Bohrungen gibt es zwei Verfahren, die sich durch die Art der Gesteinszerstörung unterscheiden. Einerseits sind das die reinen Spülbohrungen, hier findet die Gesteinszerstörung, wie in Teil 1 Abschnitt 2.1.1.6 beschrieben, durch die hydraulische Lösearbeit der Bohrspülung statt. Andererseits sind das Verfahren bei denen zur Lösung des Gesteins Rollenmeißel verwendet werden. Die Ablenkung der Bohrung von ihrem Verlauf erfolgt bei diesen Verfahren jedoch durch die exzentrisch aus dem Bohrkopf ausdringende Spülung.

2.6.1 Spüllanzen

Die zur Verwendung kommenden Spüllanzen sind Bohrmeißel, die ihre Arbeit mechanisch, erodierend oder aus einer Kombination dieser zwei Wirkungsweisen verrichten. Die verschiedenen Spüllanzen unterscheiden sich nach ihrer Länge, dem Durchmesser, der Anzahl und Art der Düsen, sowie durch die Größe der Steuerfläche. Die Steuerfläche der Spüllanzen kann durch verschiedene Ausführungen ausgebildet werden. Ihr gemeinsames Ziel ist es, die Bohrung von ihrem geraden Verlauf abzulenken. Die Steuerflächen werden entweder durch spezielle Anordnungen der Düsen, durch abgeschrägte Spitzen oder einen Knick in der Spüllanze ausgebildet. Kombinationen dieser verschiedenen Ausführungsvarianten sind ebenfalls möglich. Ein Beispiel für einen Bohrkopf mit einer Steuerplatte ist der Universalbohrkopf, bei dem der Abbau des Gesteins zusätzlich durch eine mechanische Beanspruchung dessen unterstützt wird, ein weiteres Beispiel ist der Sandbohrkopf, der das Gestein alleine durch die hydraulische Energie der Spülung löst und die Steuerung über die abgeschrägte Spitze erfolgt [38]. Diese beiden Spülköpfe sind in Abbildung 2.11 dargestellt.

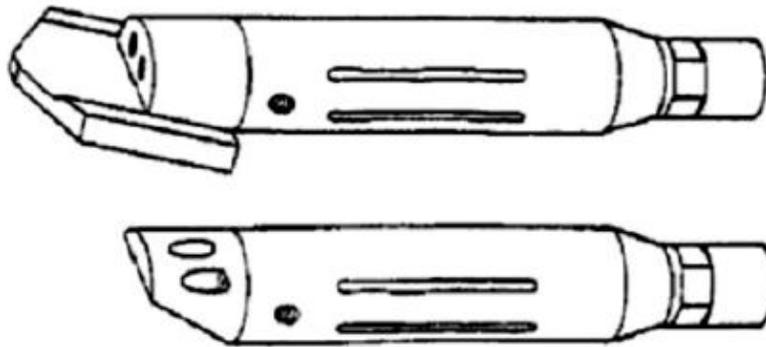


Abb. 2.11: Universalbohrkopf oben und Sandbohrkopf unten [38]

Da die normalen Ausführungsvarianten der Spülköpfe nicht ausreichen, wurden Sonderformen entwickelt. Hierbei handelt es sich um Bohrköpfe für Fließsande und torfige Böden. Bei diesen wurden an der Spitze größere Steuerplatten angeordnet, um eine ausreichend große Gegenkraft diagonal zur Längsachse zu generieren. Eine andere Sonderform stellen Spüllanzen mit einem speziellen Schneidkopf dar. Dieser Schneidkopf dient zum Durchbohren von etwaigen Hindernissen im Verlauf der Bohrung. Er beeinflusst die Steuerungseigenschaften jedoch negativ [38].

Bei diesem Verfahren erfolgt die Steuerung der Bohrung, indem die schräge Steuerplatte oder die exzentrischen Düsen so ausgereicht werden, dass sie in die zu bohrende Richtung weisen. Um einen geraden Verlauf zu erbohren, wird der gesamte Bohrstrang wie auch bei den anderen gesteuerten Bohrverfahren rotiert [38].

Dieses Verfahren wurde für die vorauseilenden Vereisungsbohrungen für die Errichtung der Wehrhahn-Linie in Düsseldorf verwendet. Hierfür wurden bis zu 72 m lange Bohrungen abgeteuft. Aus geologischer Sicht befanden sich diese Bohrungen in den quartären Kiesen und Sanden der Niederterrasse des Rheins. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Lagegenauigkeit dieser Bohrungen wurde mit einem gesteuerten Verfahren gearbeitet. Eingesetzt wurde hierfür ein Spülbohrkopf mit einer schrägen Steuerplatte, der durch eine Kombination aus bentonitgestützter Spülbohrung und einer mechanischen Vorpressung abgebohrt wurde. Vermessen wurden diese

Bohrungen mit einem Kreiselkompasssystem. Die erzielten Genauigkeiten der Bohrungen lagen bei 0,04% [73].

2.6.2 Jetting

Dieses Verfahren kommt bei verlaufsgesteuerten Bohrungen in weichen Formationen zur Anwendung. Die mechanische Gesteinszerstörung erfolgt im Gegensatz zu Spülbohrungen durch Rollenmeißel. Bei den zur Verwendung kommenden Meißeln handelt es sich um speziell für derartige Anwendungen modifizierte Rollenmeißel. Diese Drei-Rollen-Meißel besitzen drei Spüldüsen, wobei eine dieser Düsen sehr viel größer als die anderen ist. Um den Verlauf einer Bohrung mit solchen Meißeln zu steuern, wird der Meißel so ausgerichtet, dass die größte Düse in die gewünschte Bohrrichtung zeigt. Im Anschluss wird über eine längere Strecke, für gewöhnlich zwischen 1 und 2 m, mit hohem Spülungsdruck gespült, bis sich der erste Stabilisator in der abgelenkten Bohrstrecke befindet. Danach wird die Spülmengenge verringert und rotierend weitergebohrt. So werden die nächsten Meter der Bohrung abgeteuft. Im Anschluss daran wird die ausgeführte Abweichung messtechnisch überprüft, um im Fall einer ungenügenden Abweichung weitere Maßnahmen setzen zu können [79]. Die einzelnen Verfahrensschritte sind in Abbildung 2.12 ersichtlich.

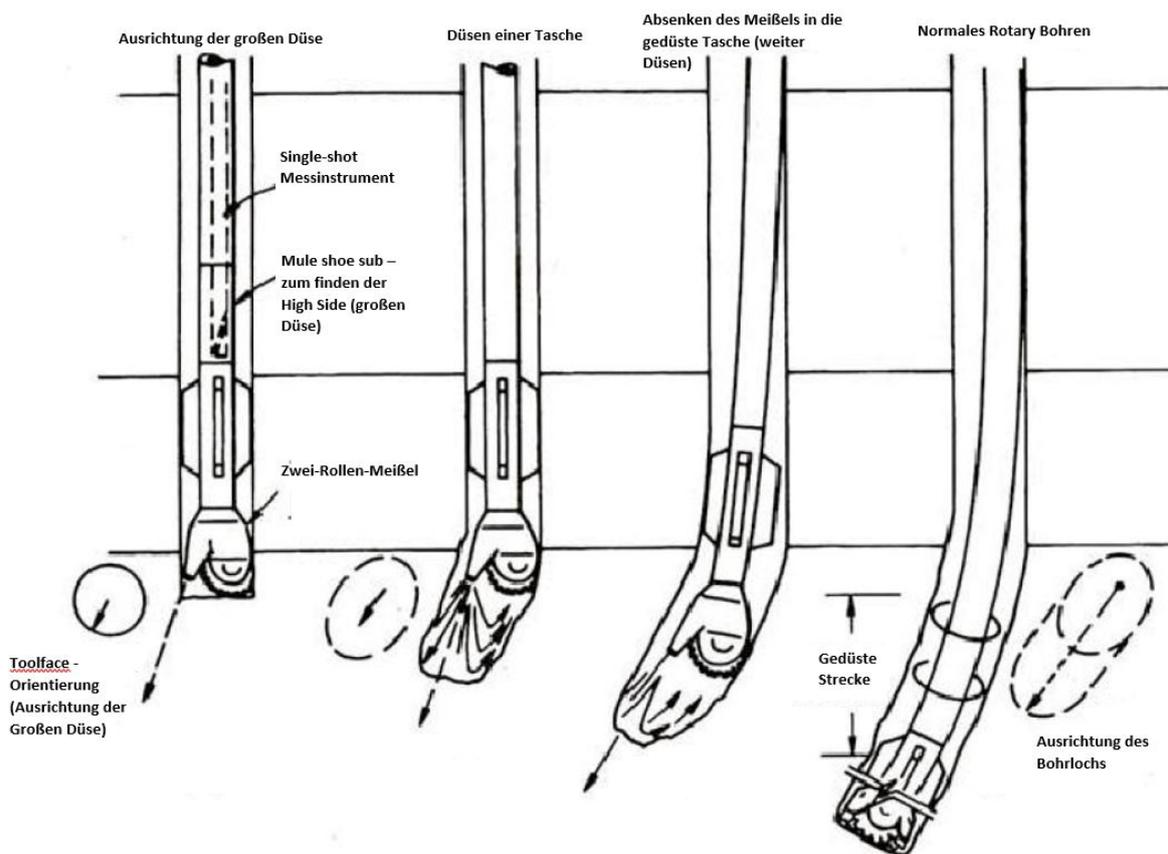


Abb. 2.12: Verfahrensschritte Jetten nach: [79]

Bei diesem Verfahren handelt es sich um ein einfaches und kostengünstiges, gesteuertes, Bohrverfahren. Ein Vorteil im Vergleich zu MUD-Motor Bohrungen ist, dass das MWD-System

in unmittelbarer Nähe des Meißels angeordnet und die Position des Meißels dadurch sehr genau bestimmt werden kann [79].

Am effektivsten lässt sich dieses Verfahren in weichen Sanden und Kalksteinen einsetzen. Für eine effektive Zerstörung des Gesteins werden hohe Spülraten verwendet, die auch in der Lage sind, das anfallende Bohrklein schnell aus dem Loch zu fördern. In sehr weichen Formationen verursachen, die zum Einsatz kommenden Spülraten ein Auswaschen der bohrlochnahen Bereiche. Um dies zu vermeiden, muss für jede Bohrung der optimale Spüldurchfluss ermittelt werden, um dennoch einen hohen Bohrfortschritt sowie eine Richtungsstabilität zu erzielen [79].

In sehr weichen Felsformationen ist es möglich, dass sich der Bohrstrang an der Innenseite der erbohrten Kurven in das Gestein einschneidet und somit die Auslenkung aus der Achse nicht erreicht werden kann [79].

Teil III

**Analyse und Interpretation von
Bohrdaten**

Kapitel 1

Auswertung und Interpretation von aufgezeichneten Bohrdaten

Das Ziel der gegenständlichen Auswertung war es, Zusammenhänge zwischen den aufgezeichneten Bohrdaten und der geologischen Beschaffenheit des Gebirges anhand von aufgezeichneten Verfahrensparametern herzustellen. Derartige Zusammenhänge ermöglichen es, während des Bohrvorgangs Aussagen zu treffen, ob ein Steuerungsvorgang in der aktuellen Tiefenstufe möglich bzw. sinnvoll ist.

Da für erfolgreiche Steuerungsmanöver gewisse Anforderungen – wie etwa eine stabile Bohrlochwand – an das Gebirge gestellt werden müssen, ist es essentiell, derartige Gebirgszustände anhand der Bohrdaten zu erkennen, um im Fall von negativen Formationsänderungen den Steuervorgang gegebenenfalls abbrechen zu können.

Bei den untersuchten Bohrungen handelt es sich um verrohrte Bohrungen, die mit einem Wassara Imlochhammer abgeteuft wurden. Die Funktionsweise dieses Systems wurde in Teil 1 Abschnitt 2.1.2.1 bereits erläutert. Bei diesen Bohrungen fungierte die Außenverrohrung sowohl als Steuerelement als auch zur Stützung des Bohrlochs. Um die Bohrung außermittig von ihrem Verlauf abzulenken, wurden die an der Verrohrung aufgeschweißten Ablenkleisten so ausgerichtet, dass die Bohrung in die gewünschte Richtung von ihrem geraden Verlauf abweicht. Zum Bohren einer geraden Strecke wurde die Außenverrohrung rotiert. Durch die Rotation wurde der Exzentrizität entgegen gewirkt und die Bohrung verlief gerade (siehe Teil 2 Abschnitt 2.2.2). Die Längen der betrachteten Bohrungen lagen zwischen 60 und 120 m.

Geologisch gesehen wurden die Bohrungen in stark zerlegtem und zerklüftetem Gebirge abgeteuft. Aufgrund der starken Zersetzung des Gebirges kam es während des Bohrvorgangs verstärkt zu den in Teil 1 Abschnitt 2.4 beschriebenen verfahrens- sowie geologisch bedingten Abweichungen der Bohrungen von ihrem geplanten Verlauf. Allgemein ist zu sagen, dass alle Bohrungen aufgrund der eingetretenen Setzungen im Bohrloch und der zusätzlichen Rotation des Bohrstrangs nach rechts nach rechts unten abwichen.

Das Ziel während der Bohrarbeiten war es, durch das aktive Eingreifen in Form von Steuerungsmanövern diese Abweichungen zu minimieren und die Bohrungen entlang ihrer geplanten Verläufe abzuteufen. Aufgrund der schlechten geologischen Verhältnisse war dies nur bedingt möglich.

Während des Bohrvorgangs erfolgte eine kontinuierliche Aufzeichnung der Bohrdaten. Zusätzlich zur Aufzeichnung der Bohrdaten wurden die Bohrungen in regelmäßigen Abständen vermessen, um durch die zum Einsatz kommende Technik zu großen Abweichungen entgegenwirken zu können. Diese Vermessungsdaten wurden ebenfalls für die Analyse der Bohrdaten herangezogen.

Des Weiteren wurden bei einigen der untersuchten Bohrungen geophysikalische Bohrlochversuche ausgeführt.

1.1 Bohrdatenerfassung (B.D.E.)

Die Aufzeichnung der Bohrdaten erfolgte mit der Software Exges. Hierbei handelt es sich um eine Entwicklung der Firma *Züblin Spezialtiefbau Ges.m.b.H.*. Diese Software wird gemeinsam mit der Bohrdatenerfassung eingesetzt und dient zur Messung, Steuerung sowie zur Visualisierung der Bohrparameter. Nach dem Abschluss einer Bohrung konnten die gesammelten Daten zur Analyse und Auswertung der jeweiligen Prozesse herangezogen werden.

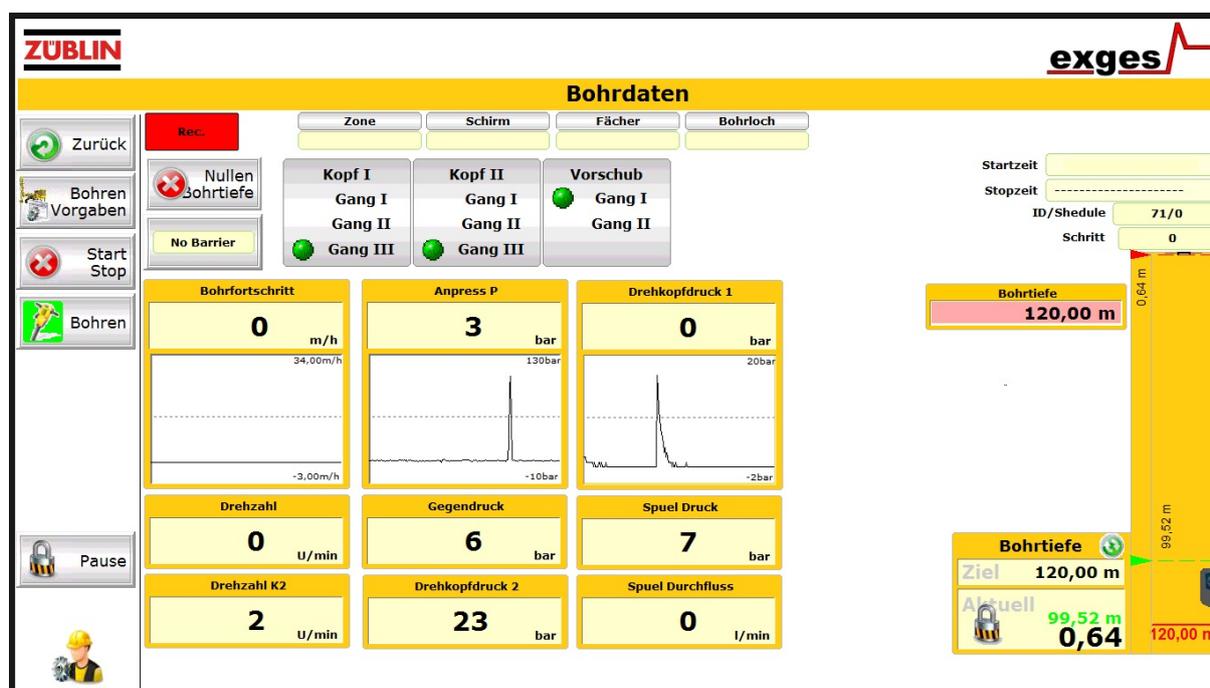


Abb. 1.1: Software Exges der Firma Züblin

Die Komponenten der Bohrdatenaufzeichnung sind ein Industriecomputer oder -tabletpc, der zur Visualisierung der Parameter während des Bohrvorgangs dient (siehe Abbildung 1.1), die zur Aufzeichnung, der zu sammelnden Daten, notwendigen Sensoren sowie ein Tiefengeber.

Im Fall der untersuchten Bohrungen wurden die folgenden Daten aufgezeichnet:

- Bohrfortschritt in [cm/min] und in [m/h]
- Drehzahl des Bohr- und des Außengestänges [1/min]
- Drehkopfdruck der beiden Kraftdrehköpfe [bar]
- Drehmoment [Nm]
- Anpressdruck [bar]
- Spüldruck [bar]
- Spüldurchfluss [l/min]

Die Erfassung der Daten erfolgt abhängig von der Zeit und der Tiefe der Bohrung. Abbildung 1.2 zeigt die Komponenten der B.D.E. und ihre Anordnung am Bohrgerät [100].



Abb. 1.2: Komponenten der Bohrdatenerfassung und ihre Anordnung am Bohrgerät [100]

1.2 Vermessungsdaten

Die Bohrlochvermessung erfolgte mit der Messsonde Drill-Pilot®. Bei dieser Messsonde handelt es sich ebenfalls um eine Entwicklung der Firma *Züblin Spezialtiefbau Ges.m.b.H.*. Die Vermessung mit dieser Sonde basiert auf der Vermessung mit Kreiseln, nähere Informationen zur Vermessung mit diesem System sind in Abschnitt 1 Kapitel 3.2.7 zu finden. Die Ausgabe der gemessenen Werte erfolgt in Bezug auf ein lokales Koordinatensystem. Mit Hilfe einer Excel-Routine ist es möglich dieses Koordinatensystem in das globale Koordinatensystem zu überführen. Die gemessenen Werte werden nach dieser Transformationen in der Form von Gauss-Krüger-Koordinaten ausgegeben. Durch eine Gegenüberstellung mit dem SOLL-Verlauf der Bohrung kann auf die tatsächlichen Abweichungen rückgeschlossen werden. In Abbildung 1.3 ist ein derartiges Auswertungsprotokoll ersichtlich. Die Schritte, in denen die Daten ausgegeben werden, können beliebig angepasst werden. Das kleinste mögliche Intervall beträgt 0,4 m.

Zusätzlich zur tabellarischen Auswertung ist eine grafische Darstellung des Verlaufs in Bezug zur Soll-Lage der Bohrung möglich (siehe Abbildung 1.4).

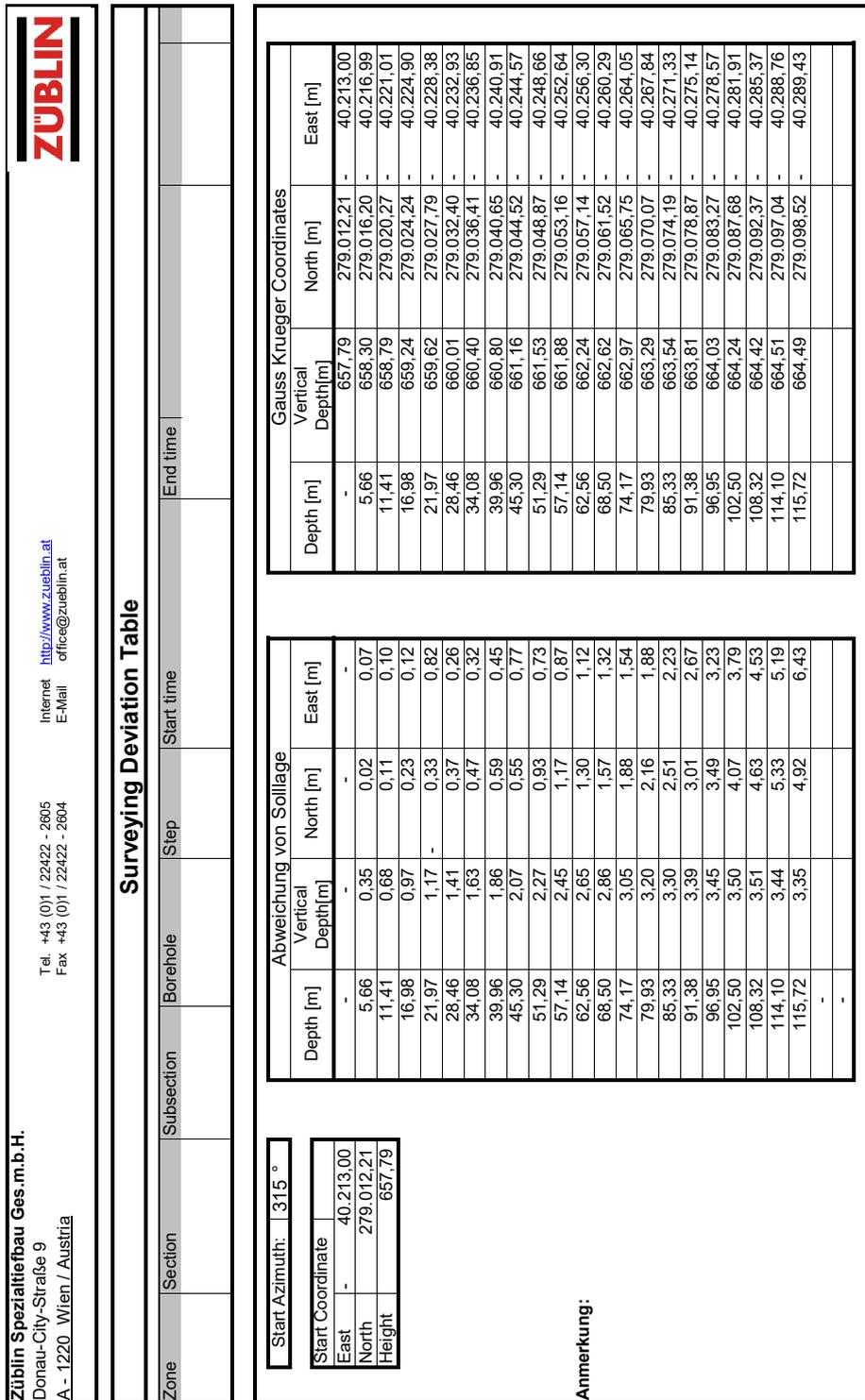


Abb. 1.3: Auswertungsprotokoll einer Bohrlochvermessung

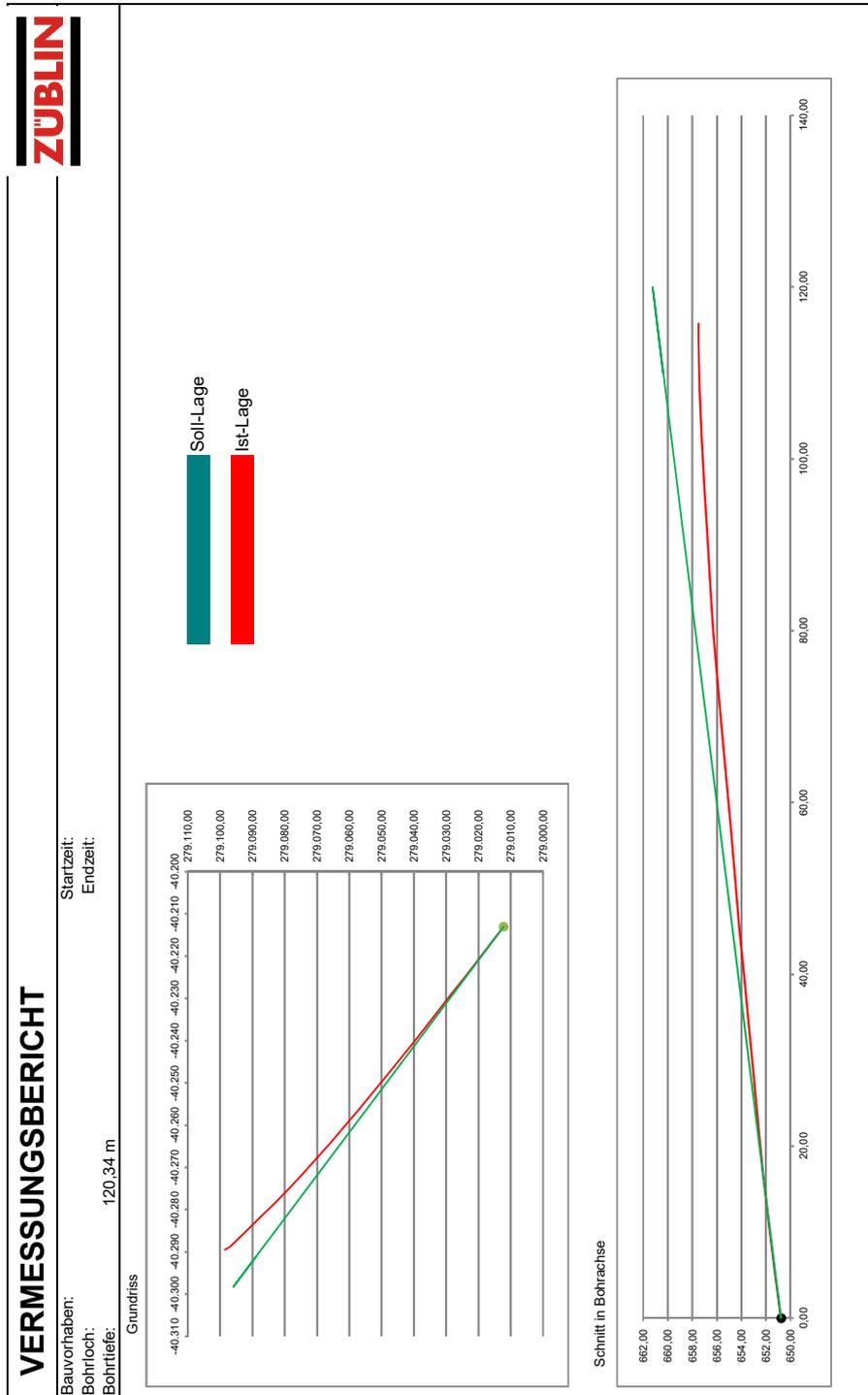


Abb. 1.4: Grafische Auswertung einer Bohrlochvermessung

1.3 Geophysikalische Vermessungsdaten

Im Zuge der geophysikalischen Bohrlochvermessung wurden sowohl Kamerabefahrungen des Bohrlochs als auch Versuche mit dem OBI (optical borehole investigation) und Gammaray-Versuche ausgeführt.

Für die Auswertung der Bohrdaten wurden die aus der Kamerabefahrung gewonnenen Erkenntnisse herangezogen. Diese Versuche wurden so ausgeführt, dass eine Sonde, die mit einer Kamera und einem Tiefengeber ausgestattet ist, in das Bohrloch geführt wurde. Für die erfolgreiche Ausführung dieses Versuchs müssen gewisse Anforderungen an die Bohrungen gestellt werden. Die wichtigste dieser Anforderungen ist, dass das Bohrloch nicht verstimmt, da die Sonde in derartigen Fällen nur sehr aufwendig wieder geborgen werden kann. Eine weitere Anforderung ist, dass sich in den Bohrlöchern kein oder nur wenig Wasser befindet, da dieses die Sichtverhältnisse sehr stark verschlechtert. Aus diesem Grund werden Bohrungen, in denen derartige Versuche ausgeführt werden, immer mit einer gewissen Neigung ausgeführt, damit das anfallende Wasser aus dem Bohrloch fließen kann.

1.4 Auswertung der Messergebnisse

Ausgewertet wurden sechs Abschnitte in denen je drei Bohrungen abgeteuft wurden. Bei all diesen Bohrungen wurden während des Bohrvorgangs die relevanten Bohrparameter aufgezeichnet. Die aufgezeichneten Daten wurden in Form von Excel Sheets ausgegeben. So waren pro Bohrung bis zu 144.000 Dateneinträge vorhanden.

Des Weiteren standen die Daten der Verlaufsmessungen all dieser Bohrungen zur Verfügung. Bei jeweils einer der drei Bohrungen wurden zusätzlich zur Aufzeichnung der Bohrdaten, geophysikalische Bohrlochversuche ausgeführt.

1.4.1 Abschnitt 1

Im ersten Schritt der Auswertung erfolgte die Analyse der Bohr- und Vermessungsdaten. Es wurden jene Bereiche aus den Daten gefiltert, in denen erfolgreiche Steuerungsmanöver ausgeführt wurden. Der Einfachheit halber wurden lediglich Steuerungsmanöver in der vertikalen Ebene betrachtet.

Um festzustellen, ob in einer Tiefenstufe erfolgreich gesteuert wurde, mussten zwei Kriterien erfüllt sein.

- Das erste Kriterium war, dass gemäß der Aufzeichnung der Bohrdaten ein Lenkeversuch stattgefunden hat. Dies war durch die fehlende Rotation der Außenverrohrung erkennbar (siehe Tabelle 1.1 gelb markierter Bereich).
- Das zweite Kriterium war, dass es zu einer Zunahme der Steigung der Bohrung gekommen ist. Diese Zunahme ließ sich mit Hilfe einer Auswertung der Vermessungsdaten feststellen.

Diese Kriterien wurden in einem ersten Schritt getrennt voneinander überprüft. Hierfür wurden zwei Routinen in Excel programmiert, um all jene Bereiche aus den Bohr- sowie Vermessungsdaten zu filtern, in denen das jeweilige Kriterium erfüllt war. In Tabelle 1.2 ist ein Ausschnitt aus der Auswertung der Vermessungsdaten dargestellt. Die gelb markierten Bereiche stellen jene Abschnitte dar, in denen es zu einer Zunahme der Steigung der Bohrung gekommen ist.

Die in Tabelle 1.2 dargestellten Werte sind die aus der Vermessung eines Bohrlochs gewonnenen Werte, wobei sich diese auf die Solllage der Bohrung beziehen (siehe Abbildung 1.3).

Tab. 1.1: Auswertung der Bohrdaten

Tiefe [m]	Fortschritt 1 [cm/min]	Fortschritt 2 [m/h]	Drehzahl 1 [1/min]	Drehzahl 2 [1/min]	Drehkopfdruck 1 [bar]	Drehkopfdruck 2 [bar]	Drehmoment 1 [Nm]	Drehmoment 2 [Nm]	Anpressdruck [bar]	Spuldruck [bar]	Spuldurchfluss [l/min]
29,35	14,33	9,38	19,98	26,97	95,03	66,02	4.652	1.611	79,02	102,98	203
29,36	14,33	9	22	24,99	92,03	60,02	4.699	1.515	80,03	102,98	205,99
29,37	14,33	9	22	24,99	91,03	57,02	4.745	1.539	79,02	102,98	204,98
29,38	14,33	9,38	22	24,99	77,02	65,02	4.234	1.587	83,03	93,97	203
29,39	14,33	9	14,97	24,99	26,01	59,02	1.581	1.443	191,06	89	205,99
29,4	14,33	9	-0,02	24,99	11,01	61,02	651	1.635	194,06	101	205,99
29,41	10,24	7,13	-0,02	24,99	3	58,02	279	1.515	193,06	94,98	205,99
29,42	12,28	7,5	-0,02	22	2	60,02	139	1.491	190,06	85,97	204,98
29,43	4,09	3,38	-0,02	24,99	0	53,02	93	1.491	132,04	99,99	211,97
29,44	18,43	11,25	-0,02	22	90,03	66,02	4.513	1.611	75,02	91,99	207
29,45	20,47	12,38	-0,02	22	101,03	63,02	4.234	1.611	77,02	101	207
29,46	30,71	18,38	14,97	24,99	92,03	71,02	4.699	1.659	78,02	89	207
29,47	16,38	10,5	14,97	24,99	97,03	56,02	4.094	1.539	78,02	95,99	207
29,48	14,33	9	22	22	97,03	63,02	4.234	1.731	81,03	86,98	203
29,49	16,38	10,5	22	22	90,03	62,02	4.559	1.515	80,03	86,98	204,98
29,5	14,33	9,38	19,98	24,99	93,03	63,02	4.513	1.515	78,02	95,99	205,99

Tab. 1.2: Auswertung der Vermessungsdaten

	Tiefe	Abweichung	Δk
1	7,427	0,029	0,014
2	7,897	0,030	0,002
3	8,257	0,029	-0,003
4	9,016	0,047	0,023
5	9,466	0,048	0,002
6	9,746	0,050	0,006
7	10,484	0,067	0,024
8	11,034	0,084	0,031
9	11,404	0,087	0,008
10	11,844	0,088	0,003

Die Überprüfung ob es zu einer Zunahme der Steigung gekommen ist erfolgt folgendermaßen:

$$k_{23} = \frac{\Delta \text{Abweichung}}{\Delta \text{Tiefe}} = \frac{(0,029 - 0,030)}{(8,257 - 7,897)} = -0,003 \quad (1.1)$$

$$k_{34} = \frac{\Delta \text{Abweichung}}{\Delta \text{Tiefe}} = \frac{(0,047 - 0,029)}{(9,016 - 8,257)} = 0,023 \quad (1.2)$$

$$k_{23} < k_{34} \quad (1.3)$$

Sind die beiden Kriterien in der selben Tiefenstufe erfüllt, so kann davon ausgegangen werden, dass ein erfolgreicher Steuervorgang ausgeführt wurde. Die Zusammenführung dieser zwei Datensätze erfolgte mit Hilfe von Visual Basic. Im Anschluss an diese Auswertung war ein zu jeder Bohrung gehöriger Datensatz mit allen Tiefenstufen, in denen erfolgreiche Steuermanöver ausgeführt wurden und den zu den Tiefenstufen dazugehörigen Bohrdaten vorhanden.

Im nächsten Schritt wurden aus den Aufnahmen aus den Kamerabefahrungen, die im Zuge der geophysikalischen Bohrlochversuche ausgeführt wurden, Informationen zum optischen Zustand der Bohrlöcher gesammelt. Anhand dieser Informationen war es möglich, die Bohrdaten des

jeweiligen Bereichs zu eichen. Hierfür wurden drei Bereiche definiert, die sich durch die optische Beschaffenheit der Bohrlöcher voneinander unterscheiden.

Diese Bereiche sind:

- **Bereich A:** Bereiche mit kompaktem Gestein und kleineren Klüften (siehe Abbildung 1.5),



Abb. 1.5: Optische Merkmale des Gebirgsbereichs A (der rote Ring stellt das ursprüngliche Bohrloch dar) [87]

- **Bereich B:** Bereiche mit kompaktem Gestein, Klüften und kleineren Aufweitungen und Mehrausbrüchen (siehe Abbildung 1.6) sowie

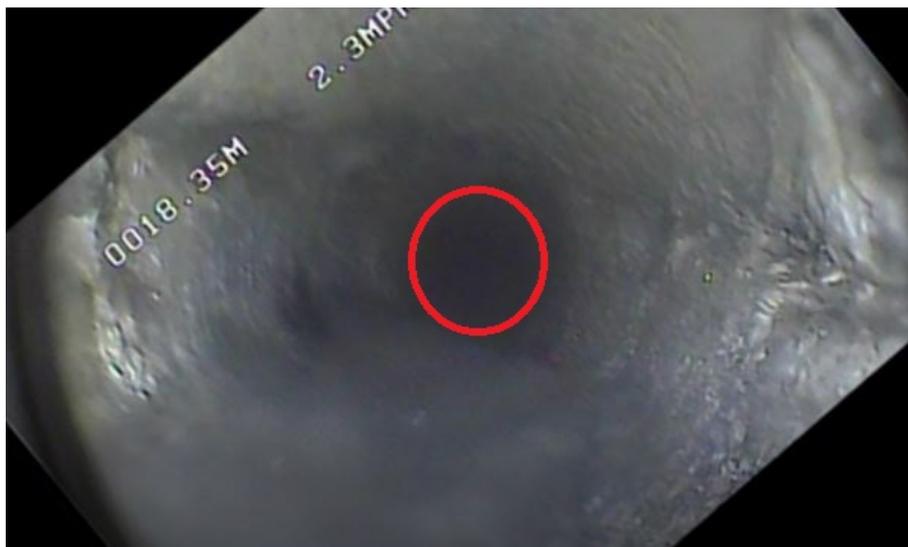


Abb. 1.6: Optische Merkmale des Gebirgsbereichs B (der rote Ring stellt das ursprüngliche Bohrloch dar) [87]

- **Bereich C:** Bereiche mit aufgelockertem Gestein und großen Aufweitungen des Bohrlochs (siehe Abbildung 1.7).



Abb. 1.7: Optische Merkmale des Gebirgsbereichs C (der rote Ring stellt das ursprüngliche Bohrloch dar) [87]

Durch die Analyse der aus den Kamerabefahrungen gewonnenen Daten konnten die verschiedenen Abschnitte der Bohrungen den zuvor definierten Bereichen zugeordnet werden. Hierfür erfolgte im ersten Schritt eine Analyse der Aufnahmen aus den Kamerabefahrungen. Bei dieser Analyse wurden jene Abschnitte aus den Aufnahmen herausgearbeitet, die den zuvor definierten Gebirgsbereichen klar zugeordnet werden konnten. Im nächsten Schritt wurden den zu den Gebirgsbereichen gehörigen Abschnitten die aufgezeichneten Bohrdaten zugeordnet. Hierfür wurden die Bohrdaten herangezogen, die sich in einem maximalen Abstand von ± 10 cm zum ausgewählten Punkt befanden.

Um die Anzahl der zu untersuchenden Daten zu reduzieren, erfolgte im nächsten Schritt eine Analyse der Bohrdaten der verschiedenen Bereiche. Das Ziel dieser Betrachtung war es, Gemeinsamkeiten zwischen den einzelnen untersuchten Datensätzen zu erkennen, um in weiterer Folge jene Datensätze herauszufiltern, anhand derer sich der Zustand des Gebirges am besten abbilden lässt. Durch die grafische Ausgabe und darauffolgende Analyse der Daten war es möglich, Wechselbeziehungen zwischen den einzelnen Datensätzen herauszuarbeiten. Hierfür wurden die unterschiedlichen aufgezeichneten Daten über die Tiefe in Diagrammen ausgegeben. Diese Diagramme wurden zur Analyse übereinander gelegt. So war es möglich, Korrelationen zwischen den unterschiedlichen Werten herauszuarbeiten. Bei dieser Betrachtung stellte sich heraus, dass die gemeinsame Betrachtung von Bohrfortschritt und Spülungsdruck die zuverlässigsten Parameter in Bezug auf den Gebirgszustand waren. In Abbildung 1.8 lässt sich die Korrelation dieser beiden Datensätze erkennen. In kompakten Abschnitten wurde ein geringer Bohrfortschritt mit einem hohen Spülungsdruck verzeichnet, während mit zunehmender Verschlechterung des Gebirgszustandes, das heißt einer zunehmenden Auflockerung des Gebirges, der Bohrfortschritt

zunahm und es zu einer gleichzeitigen Reduktion des Spülungsdruckes kam.

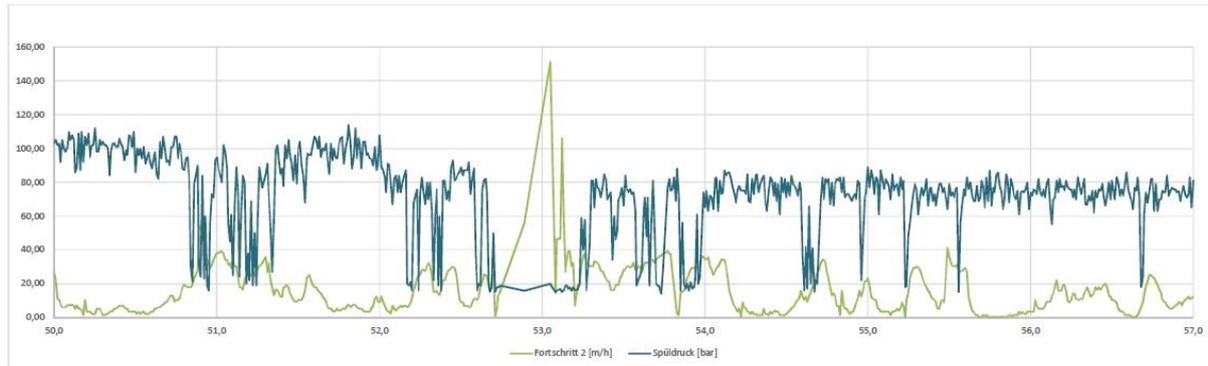


Abb. 1.8: Korrelation zwischen dem Bohrfortschritt und dem Spüldruck

Im nächsten Schritt wurden aus den Bohrdaten, die den jeweiligen Bereichen zugeordnet wurden, Datensätze erstellt, aus denen die Mittelwerte für die Bohrgeschwindigkeiten sowie die Spülungsdrücke errechnet wurden.

So war es möglich für jeden der sechs untersuchten Abschnitte jeweils drei zu den definierten Bereichen zugehörige Mittelwerte für die Bohrgeschwindigkeit sowie den Spülungsdruck zu errechnen (siehe Tabelle 1.3).

Bereits während der Bohrarbeiten konnte im Abschnitt 1 festgestellt werden, dass es sich um einen vergleichsweise weichen Gebirgsbereich handelt. Diese Feststellung wurde durch die den definierten Bereichen zugeordneten Mittelwerte bestätigt.

Tab. 1.3: Mittelwerte der Bohrdaten in den definierten Bereichen (Abschnitt 1)

Mittelwerte			
Bereich		Bohrfortschritt [m/h]	Spülungsdruck [bar]
A	Kompaktes Gestein mit kleineren Klüften	12,833	96,19
B	Kompaktes geklüftetes Gestein mit kleineren Mehrausbrüchen	18,486	97,10
C	Aufgelockertes Gestein mit großen Aufweitungen und Mehrausbrüchen	25,935	84,07

Bei der Betrachtung der Mittelwerte fällt des Weiteren auf, dass der mittlere Spülungsdruck für den Bereich B größer als jener für den Bereich A ist. Dieser Umstand lässt sich durch eine höhere Konzentration an Feinteilen sowie tonigen Bestandteilen in diesem Gebirgsbereich erklären. Durch diese wurden die feinen Klüfte verschlossen. Dies führte zu einem erhöhten Spülungsdruck in diesen Bereichen.

Um die Bohrdaten den jeweiligen Bereichen zuordnen zu können, war es notwendig, Grenzen für die zuvor definierten Bereiche zu formulieren. Dies wurde durch die erneute Errechnung von Mittelwerten zwischen den jeweiligen Bereichen erzielt. Die Ergebnisse für den Abschnitt 1 sind in Tabelle 1.4 dargestellt.

Anhand dieser Grenzwerte wurden die Bohrdaten aller im Abschnitt 1 liegenden Bohrungen ausgewertet. Die Auswertung erfolgte in einem ersten Schritt getrennt für die beiden betrachteten

Tab. 1.4: Grenzwerte der Bereiche (Abschnitt 1)

Grenzwerte			
Bereich		Bohrfortschritt [m/h]	Spülungsdruck [bar]
A	Kompaktes Gestein mit kleineren Klüften	<15,684	90,585 - 96,645
B	Kompaktes geklüftetes Gestein mit kleineren Mehrausbrüchen	15,684 - 22,21	>96,645
C	Aufgelockertes Gestein mit großen Aufweitungen und Mehrausbrüchen	>22,21	<90,585

Parameter (siehe Tabelle 1.5 und Tabelle 1.6). Bei dieser Betrachtung wurde jeweils nur der Bohrfortschritt oder der Spülungsdruck als Grundlage für die Zuordnung zu den einzelnen Bereichen berücksichtigt. In einem weiteren Schritt wurden die Daten nach beiden Parametern ausgewertet. Bei der kombinierten Betrachtung der Bohrparameter steht der erste Buchstabe für das Kriterium des Bohrfortschritts und der zweite für jenen des Spülungsdruckes. Das heißt, die zum Bereich A-C zugeordneten Streckenabschnitte wurden nach dem Kriterium Bohrfortschritt als Bereich A und nach dem Kriterium Spülungsdruck als Bereich C klassifiziert. Das Ergebnis dieser Auswertung ist in Tabelle 1.7 ersichtlich.

Tab. 1.5: Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Bohrfortschritts (Abschnitt 1)

Bohrfortschritt			
	A	B	C
Länge der erfolgreichen Lenkmanöver [m]	4,64 m	2,31 m	2,08 m
Anteil der erfolgreichen Lenkmanöver [%]	51,4 %	25,6 %	23,0 %

Tab. 1.6: Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Spülungsdrucks (Abschnitt 1)

Spülungsdruck			
	A	B	C
Länge der erfolgreichen Lenkmanöver [m]	2,34 m	1,84 m	4,85 m
Anteil der erfolgreichen Lenkmanöver [%]	25,9 %	20,4 %	53,7 %

Tab. 1.7: Auswertung nach der kombinierten Betrachtungsweise (Abschnitt 1)

Kombinierte Betrachtung der Bohrparameter									
	AA	BB	CC	AB	AC	BA	BC	CA	CB
Länge [m]	1,25 m	0,59 m	1,06 m	0,63 m	2,76 m	0,69 m	1,03 m	0,40 m	0,62 m
Anteile [%]	13,8 %	6,5 %	11,7 %	7,0 %	30,6 %	7,6 %	11,4 %	4,4 %	6,9 %

Beim Vergleich der für diesen Bereich ermittelten Grenzwerte mit denen der anderen Abschnitte fällt auf, dass es sich um vergleichsweise hohe Bohrgeschwindigkeiten handelt. Da höhere Bohrgeschwindigkeiten, beispielsweise nach Thuro [89], im Allgemeinen ein Anzeichen für weichere

Abschnitte (vgl. Abschnitt 2.3.2.2) und somit für das Verfahren nicht optimal geeignete Bereiche sind, wird angenommen, dass keine genauen Aussagen zum Erfolg bezüglich der verschiedenen Bereiche gemacht werden können.

Aus dieser Aufstellung geht hervor, dass bei einer getrennten Betrachtung der untersuchten Parameter – Bohrgeschwindigkeit und Spüldruck – 51,4 % der erfolgreichen Lenkmanöver in jenen Bereichen ausgeführt wurden, die im Hinblick auf die Bohrgeschwindigkeit dem Gebirgsbereich A zugeordnet werden können. Im Gegensatz dazu fanden bei der alleinigen Betrachtung des Spüldrucks 53,7 % der Lenkmanöver im Gebirgsbereich C statt. Die kombinierte Betrachtung der beiden untersuchten Parameter ergab, dass der Großteil der erfolgreichen Steuerungsmanöver in einer Kombination der Bereiche A und C stattgefunden hat. Dies sind Bereiche mit geringer Bohrgeschwindigkeit und einem geringen Spülungsdruck. Ein geringer Spülungsdruck impliziert in den meisten Fällen große Aufweitungen des Bohrlochs. Diese sind wiederum auf stark zerklüftete gestörte Formationen zurückzuführen. In derartigen Formationen ist eine erfolgreiche Richtungsänderung der Bohrung mit dem gewählten Steuerungssystem nur selten möglich. Dieser Umstand führt zu der Annahme, dass die aufgezeichnete Zunahme der Steigung nicht durch die Steuervorgänge selbst, sondern durch die Ausbildung eines Keils unter dem Bohrgestänge hervorgerufen wurde. Derartige Keile können sich aus ins Bohrloch stürzendem Material ausbilden. Des Weiteren lässt sich die geringe Bohrgeschwindigkeit, die gleichzeitig mit einem geringen Spülungsdruck auftritt, dadurch erklären, dass das anfallende Material im Bereich von großen Mehrausbrüchen nur langsam aus dem Bohrloch transportiert wird, da hierfür die erforderlichen Drücke nicht zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund kommt es zu einer starken Nachzerkleinerung der erbohrten Cuttins. Derartige Nachzerkleinerungen führen im Bereich AC, wie in Teil 1 Abschnitt 2.3.4 beschrieben, zu einer starken Reduktion der erzielbaren Bohrgeschwindigkeiten.

1.4.2 Abschnitt 2

Für diesen Bereich ergab die in Abschnitt 1.4.1 beschriebene Auswertung der Daten folgende Mittel- sowie Grenzwerte für die jeweiligen Bereiche (siehe Tabelle 1.8 und Tabelle 1.9).

Tab. 1.8: Mittelwerte der Bohrdaten in den definierten Bereichen (Abschnitt 2)

Mittelwerte			
Bereich		Bohrfortschritt [m/h]	Spülungsdruck [bar]
A	Kompaktes Gestein mit kleineren Klüften	4,151	89,544
B	Kompaktes geklüftetes Gestein mit kleineren Mehrausbrüchen	13,685	75,648
C	Aufgelockertes Gestein mit großen Aufweitungen und Mehrausbrüchen	16,192	68,569

Anhand dieser Grenzwerte wurden die Bohrdaten aller im Abschnitt 2 liegenden Bohrungen ausgewertet. Die Auswertung erfolgte in einem ersten Schritt analog zum Abschnitt 1, getrennt für die beiden betrachteten Parameter (siehe Tabelle 1.10 und 1.11). In einem weiteren Schritt wurden die Daten nach beiden Parametern ausgewertet. Das Ergebnis dieser Auswertung ist in Tabelle 1.12 ersichtlich.

Die kombinierte Betrachtung der zu untersuchenden Parameter ergab, dass in diesem Abschnitt mit dem größten Erfolg im Gebirgsbereich BA (20,8 %) gesteuert werden konnte. Erfolgreiche Steuerungsmanöver in derartigen Abschnitten lassen sich einerseits durch ein tragfähiges Gebirge in diesen Abschnitten, aber auch durch die Ausbildung von Keilen unter der Verrohrung erklären.

Tab. 1.9: Grenzwerte der Bereiche (Abschnitt 2)

Grenzwerte			
Bereich		Bohrfortschritt [m/h]	Spülungsdruck [bar]
A	Kompaktes Gestein mit kleineren Klüften	<8,918	>82,596
B	Kompaktes geklüftetes Gestein mit kleineren Mehrausbrüchen	8,918 - 14,939	82,596 - 72,108
C	Aufgelockertes Gestein mit großen Aufweitungen und Mehrausbrüchen	>14,939	<72,108

Tab. 1.10: Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Bohrfortschritts (Abschnitt 2)

Bohrfortschritt			
	A	B	C
Länge der erfolgreichen Lenkmanöver [m]	3,93 m	3,98 m	3,88 m
Anteil der erfolgreichen Lenkmanöver [%]	33,3 %	33,8 %	32,9 %

Tab. 1.11: Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Spülungsdrucks (Abschnitt 2)

Spülungsdruck			
	A	B	C
Länge der erfolgreichen Lenkmanöver [m]	5,99 m	2,20 m	3,60 m
Anteil der erfolgreichen Lenkmanöver [%]	50,8 %	18,7 %	30,5 %

Eine genaue Abrenzung dieser Bereiche ist nach momentanem Wissensstand nicht möglich. 16,5 % der erfolgreichen Steuerungsmanöver fanden im Bereich AA statt. Die guten Ergebnisse in diesem Bereich lassen sich auf den kompakten gering geklüfteten Fels, der in derartigen Abschnitten angetroffen wurde zurückführen. In derartigen Bereichen werden alle an die Geologie gestellten Randbedingungen für erfolgreiche Steuermanöver erfüllt. Die wichtigste Randbedingung ist eine stabile und tragfähige Bohrlochwand, die den Ablenkleisten den notwendigen Rückhalt bietet, um die Bohrung von ihrem geraden Verlauf abzulenken. Die große Anzahl an erfolgreichen Steuerungsmanövern in Bereichen mit sehr geringen Spülungsdrücken (Bereich C) ist wie bereits in Abschnitt 1 beschrieben auf die Ausbildung von Keilen unter der Verrohrung zurückzuführen.

Tab. 1.12: Auswertung nach der kombinierten Betrachtungsweise (Abschnitt 2)

Kombinierte Betrachtung der Bohrparameter									
	AA	BB	CC	AB	AC	BA	BC	CA	CB
Länge [m]	1,94 m	0,86 m	1,59 m	0,65 m	1,34 m	2,45 m	0,67 m	1,60 m	0,69 m
Anteile [%]	16,5 %	7,3 %	13,5 %	5,5 %	11,4 %	20,8 %	5,7 %	13,6 %	5,9 %

1.4.3 Abschnitt 3

Die Eichung der Bohrdaten anhand der Daten aus der Kamerabefahrung erfolgte wie in Abschnitt 1.4.1 beschrieben und ergab für den Abschnitt 3 die folgenden Mittel- und Grenzwerte (siehe Tabelle 1.13 und Tabelle 1.14).

Tab. 1.13: Mittelwerte der Bohrdaten in den definierten Bereichen (Abschnitt 3)

Mittelwerte			
Bereich		Bohrfortschritt [m/h]	Spülungsdruck [bar]
A	Kompaktes Gestein mit kleineren Klüften	3,349	91,889
B	Kompaktes geklüftetes Gestein mit kleineren Mehrausbrüchen	10,665	89,996
C	Aufgelockertes Gestein mit großen Aufweitungen und Mehrausbrüchen	20,738	77,121

Die Werte, die sich aus der Eichung der Daten ergeben haben, sind ein erstes Anzeichen dafür, dass im vorliegenden Abschnitt immer wieder sehr kompakte Bereiche ohne größere Klüfte angetroffen wurden.

Die Zuordnung der Bohrdaten zu den für diesen Abschnitten definierten Gebirgsbereichen und die darauf folgende Auswertung ergab die nachfolgend dargestellten Ergebnisse (siehe Tabelle 1.15, Tabelle 1.16 und Tabelle 1.17)

Die getrennte Betrachtung der Parameter ergab, dass die meisten erfolgreichen Steuerungsmanöver bei der Betrachtung des Bohrfortschritts im Bereich B (43,7 % der Abschnitte in denen erfolgreich gesteuert wurde) und bei der Betrachtung des Spülungsdrucks im Bereich A (68,7 % der Abschnitte in denen erfolgreich gesteuert wurde) stattgefunden haben. Die kombinierte Betrachtung dieser Werte ergab, dass in diesem Abschnitt mit dem größten Erfolg in den Gebirgsbereichen BA (28,9 %) gefolgt vom Bereich CA (21,4 %) gesteuert werden konnte. Die erfolgreichen Steuerungsmanöver, die nicht wie die im Bereich CA auf die Ausbildung von Keilen zurückzuführen sind, lassen sich durch den kompakten, gering geklüfteten und somit tragfähigen Fels erklären, der in diesen Bereichen angetroffen wurde.

1.4.4 Abschnitt 4

Die in Abschnitt 1.4.1 beschriebene Auswertung der Bohrdaten ergab für diesen Bereich folgende Mittel- sowie Grenzwerte für die jeweiligen Bereiche (siehe Tabelle 1.18 und Tabelle 1.19).

Bei der Betrachtung der Mittelwerte für diesen Bereich fällt auf, dass der Wert des Spülungsdrucks für den Bereich B größer als jener für den Bereich B ist. Dieser Umstand lässt sich durch einen

Tab. 1.14: Grenzwerte der Bereiche (Abschnitt 3)

Grenzwerte			
Bereich		Bohrfortschritt [m/h]	Spülungsdruck [bar]
A	Kompaktes Gestein mit kleineren Klüften	<7,001	>90,943
B	Kompaktes geklüftetes Gestein mit kleineren Mehrausbrüchen	7,001 - 15,702	90,943 - 83,556
C	Aufgelockertes Gestein mit großen Aufweitungen und Mehrausbrüchen	>15,702	<83,556

Tab. 1.15: Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Bohrfortschritts (Abschnitt 3)

Bohrfortschritt			
	A	B	C
Länge der erfolgreichen Lenkmanöver [m]	0,84 m	1,45 m	1,03 m
Anteil der erfolgreichen Lenkmanöver [%]	25,3 %	43,7 %	31,0 %

Tab. 1.16: Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Spülungsdrucks (Abschnitt 3)

Spülungsdruck			
	A	B	C
Länge der erfolgreichen Lenkmanöver [m]	2,28 m	0,30 m	0,74 m
Anteil der erfolgreichen Lenkmanöver [%]	68,7 %	9,0 %	22,3 %

Tab. 1.17: Auswertung nach der kombinierten Betrachtungsweise (Abschnitt 3)

Kombinierte Betrachtung der Bohrparameter									
	AA	BB	CC	AB	AC	BA	BC	CA	CB
Länge [m]	0,61 m	0,15 m	0,20 m	0,03 m	0,20 m	0,96 m	0,34 m	0,71 m	0,12 m
Anteile [%]	18,4 %	4,5 %	6,0 %	0,9 %	6,0 %	28,9 %	10,2 %	21,4 %	3,6 %

erhöhten Eintrag an Feinteilen in diesen Bereichen erklären. Dadurch werden die feinen Klüfte verlegt und der Spülungsdruck steigt an.

Die Auswertung der Bohrdaten der Bohrungen aus dem Abschnitt Vier ergab die in den nachfolgenden Tabelle abgebildeten Werte. Die Auswertung nach den getrennten Parametern ist in Tabelle 1.20 und 1.21 ersichtlich. Die Ergebnisse der Auswertung nach beiden Kriterien ist in Tabelle 1.22 ersichtlich.

Die getrennte Betrachtung der Ergebnisse verdeutlicht bereits wie ungeeignet die Geologie in dem betrachteten Abschnitt war, um erfolgreiche Steuermanöver auszuführen. Diese Erkenntnis wird durch die Analyse der Ergebnisse der kombinierten Betrachtung bestätigt. Mit 44,3 % wurde der Großteil der erfolgreichen Steuervorgänge im Gebirgsbereich CC ausgeführt. Erfolgreiche Steuermanöver in derartig schlechten Gebirgsverhältnissen lassen sich nur durch die Ausbildung von Keilen unter dem Bohrkopf und den Steuerleisten erklären, da derartig weiche Formationen

Tab. 1.18: Mittelwerte der Bohrdaten in den definierten Bereichen (Abschnitt 4)

Mittelwerte			
Bereich		Bohrfortschritt [m/h]	Spülungsdruck [bar]
A	Kompaktes Gestein mit kleineren Klüften	9,567	106,841
B	Kompaktes geklüftetes Gestein mit kleineren Mehrausbrüchen	16,805	107,802
C	Aufgelockertes Gestein mit großen Aufweitungen und Mehrausbrüchen	18,783	88,387

Tab. 1.19: Grenzwerte der Bereiche (Abschnitt 4)

Grenzwerte			
Bereich		Bohrfortschritt [m/h]	Spülungsdruck [bar]
A	Kompaktes Gestein mit kleineren Klüften	<13,186	107,322 - 98,095
B	Kompaktes geklüftetes Gestein mit kleineren Mehrausbrüchen	13,186 - 17,794	>107,322
C	Aufgelockertes Gestein mit großen Aufweitungen und Mehrausbrüchen	>17,794	<98,095

Tab. 1.20: Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Bohrfortschritts (Abschnitt 4)

Bohrfortschritt			
	A	B	C
Länge der erfolgreichen Lenkmanöver [m]	1,24 m	0,80 m	3,31 m
Anteil der erfolgreichen Lenkmanöver [%]	23,2 %	19,5 %	76,3 %

Tab. 1.21: Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Spülungsdrucks (Abschnitt 4)

Spülungsdruck			
	A	B	C
Länge der erfolgreichen Lenkmanöver [m]	1,03 m	0,62 m	3,70 m
Anteil der erfolgreichen Lenkmanöver [%]	19,3 %	11,6 %	69,2 %

dem Steuerungsstück nicht genug Widerstand entgegenbringen können, um den Verlauf der Bohrung mit dem zum Einsatz kommenden System zu steuern.

1.4.5 Abschnitt 5

Für diesen Abschnitt ergab die Eichung der Daten, die wie in Abschnitt 1.4.1 beschrieben erfolgte, die folgenden Mittel- sowie Grenzwerte für die jeweiligen Bereiche (siehe Tabelle 1.23 und Tabelle 1.24).

Die Zuordnung der Bohrdaten jener Bereiche, in denen erfolgreiche Steuervorgänge stattgefunden haben, lieferte die in den nachfolgenden Tabellen angeführten Werte (siehe Tabelle 1.25, Tabelle 1.26 und Tabelle 1.27).

Wie bereits nach der Analyse der Videos der Kamerabefahrung festgestellt wurde, befanden sich die erste Hälfte der Bohrungen in einem sehr weichen Gebirgsbereich. Diese Feststellung spiegelte

Tab. 1.22: Auswertung nach der kombinierten Betrachtungsweise (Abschnitt 4)

Kombinierte Betrachtung der Bohrparameter									
	AA	BB	CC	AB	AC	BA	BC	CA	CB
Länge [m]	0,29 m	0,12 m	2,37 m	0,13 m	0,82 m	0,17 m	0,51 m	0,57 m	0,37 m
Anteile [%]	5,4 %	2,2 %	44,3 %	2,4 %	15,3 %	3,2 %	9,5 %	10,7 %	6,9 %

Tab. 1.23: Mittelwerte der Bohrdaten in den definierten Bereichen (Abschnitt 5)

Mittelwerte			
Bereich		Bohrfortschritt [m/h]	Spülungsdruck [bar]
A	Kompaktes Gestein mit kleineren Klüften	5,554	98,453
B	Kompaktes geklüftetes Gestein mit kleineren Mehrausbrüchen	15,609	92,386
C	Aufgelockertes Gestein mit großen Aufweitungen und Mehrausbrüchen	17,705	90,096

Tab. 1.24: Grenzwerte der Bereiche (Abschnitt 5)

Grenzwerte			
Bereich		Bohrfortschritt [m/h]	Spülungsdruck [bar]
A	Kompaktes Gestein mit kleineren Klüften	<10,581	>95,419
B	Kompaktes geklüftetes Gestein mit kleineren Mehrausbrüchen	10,581 - 16,657	95,419 - 91,241
C	Aufgelockertes Gestein mit großen Aufweitungen und Mehrausbrüchen	>16,657	<91,241

Tab. 1.25: Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Bohrfortschritts (Abschnitt 5)

Bohrfortschritt			
	A	B	C
Länge der erfolgreichen Lenkmanöver [m]	1,96 m	1,32 m	2,04 m
Anteil der erfolgreiche Lenkmanöver [%]	36,8 %	24,8 %	38,3 %

Tab. 1.26: Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Spülungsdrucks (Abschnitt 5)

Spülungsdruck			
	A	B	C
Länge der erfolgreichen Lenkmanöver [m]	1,48 m	0,39 m	3,45 m
Anteil der erfolgreichen Lenkmanöver [%]	27,8 %	7,3 %	64,8 %

Tab. 1.27: Auswertung nach der kombinierten Betrachtungsweise (Abschnitt 5)

Kombinierte Betrachtung der Bohrparameter									
	AA	BB	CC	AB	AC	BA	BC	CA	CB
Länge	0,47 m	0,06 m	1,35 m	0,15 m	1,25 m	0,5 m	0,69 m	0,45 m	0,14 m
Anteile [%]	9,3 %	1,2 %	26,7 %	3,0 %	24,7 %	9,9 %	13,6 %	8,9 %	2,8 %

sich auch in den Bohrdaten wieder. So wurden gemäß der Bohrdaten 26,7 % der erfolgreichen Steueranöver im Bereich CC ausgeführt. Wie bereits zuvor beschrieben ist es in derartig weichen

Gebirgsbereichen unmöglich, die Richtung von Bohrungen durch den Einsatz des Steuerstückes an der Außenverrohrung zu beeinflussen. Die Zunahme der Steigung der Bohrung in diesen Bereichen ist hingegen auf die Ausbildung von Keilen unter der Verrohrung zurückzuführen.

1.4.6 Abschnitt 6

Die Mittel- sowie die Grenzwerte für die jeweiligen Bereiche, die sich aus der Eichung der Bohrdaten (siehe Abschnitt 1.4.1) ergeben haben, sind in den folgenden Tabellen dargestellt (siehe Tabelle 1.28 und Tabelle 1.29).

Tab. 1.28: Mittelwerte der Bohrdaten in den definierten Bereichen (Abschnitt 6)

Mittelwerte			
Bereich		Bohrfortschritt [m/h]	Spülungsdruck [bar]
A	Kompaktes Gestein mit kleineren Klüften	1,983	104,29
B	Kompaktes geklüftetes Gestein mit kleineren Mehrausbrüchen	8,073	99,001
C	Aufgelockertes Gestein mit großen Aufweitungen und Mehrausbrüchen	17,958	67,373

Tab. 1.29: Grenzwerte der Bereiche (Abschnitt 6)

Grenzwerte			
Bereich		Bohrfortschritt [m/h]	Spülungsdruck [bar]
A	Kompaktes Gestein mit kleineren Klüften	<5,028	>101,645
B	Kompaktes geklüftetes Gestein mit kleineren Mehrausbrüchen	5,028 - 13,016	101,645 - 83,187
C	Aufgelockertes Gestein mit großen Aufweitungen und Mehrausbrüchen	>13,016	<83,187

Bereits während der Bohrarbeiten wurde festgestellt, dass es sich bei den ersten Metern der Bohrungen um einen sehr weichen Fels handelte. Diese weichen Formationsabschnitte wurden von sehr hartem Gebirge gefolgt. Diese sehr harten Abschnitte sind mitverantwortlich für den sehr geringen Bohrfortschritt, der für den Gebirgsbereich A gemeinsam mit einem hohen Spülungsdruck auftritt. Diese Feststellung wurde bei der Analyse der Kamerabefahrung bestätigt.

Die Zuordnung der Bohrdaten zu den jeweiligen Gebirgsbereichen ergab die in den Tabellen 1.30, 1.31 und 1.32 ersichtlichen Ergebnisse.

Tab. 1.30: Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Bohrfortschritts (Abschnitt 6)

Bohrfortschritt			
	A	B	C
Länge der erfolgreichen Lenkmanöver [m]	0,12 m	0,28 m	0,75 m
Anteil der erfolgreichen Lenkmanöver [%]	10,4 %	24,3 %	65,2 %

Tab. 1.31: Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Spülungsdrucks (Abschnitt 6)

Spülungsdruck			
	A	B	C
Länge der erfolgreichen Lenkmanöver [m]	0,04 m	0,15 m	0,96 m
Anteil der erfolgreichen Lenkmanöver [%]	3,5 %	13,0 %	83,5 %

Tab. 1.32: Auswertung nach der kombinierten Betrachtungsweise (Abschnitt 6)

Kombinierte Betrachtung der Bohrparameter									
	AA	BB	CC	AB	AC	BA	BC	CA	CB
Länge	0,00 m	0,05 m	0,63 m	0,01 m	0,11 m	0,01 m	0,22 m	0,03 m	0,09 m
Anteile [%]	0,0 %	4,3 %	54,8 %	0,9 %	9,6 %	0,9 %	19,1 %	2,6 %	7,8 %

Sowohl bei der getrennten Betrachtung der zu untersuchenden Parameter als auch bei deren gemeinsamer Betrachtung konnten im Bereich C beziehungsweise im Bereich CC die meisten erfolgreichen Steuerungsmanöver ausgeführt werden. In diesen sehr weichen aufgelockerten Bereichen ist eine Steuerung von Bohrungen nicht möglich, da das Gebirge das für den Steuerungsvorgang notwendige Widerlager nicht bietet.

1.4.7 Resümee

Aufgrund der stark wechselhaften Geologie, in der die untersuchten Bohrungen abgeteuft wurden, und der großen Abschnittslängen der Vermessungsdaten, war es nicht möglich, die Bereiche, in denen erfolgreiche Steuermanöver ausgeführt werden konnten, klar von jenen Bereichen abzugrenzen, in denen derartige Steuermanöver nicht möglich sind. Die Analyse und Zuordnung der Bohrdaten zu den für jeden Abschnitt eigens definierten Gebirgsbereichen hat gezeigt, dass für die erfolgreiche und gezielte Steuerung von Bohrungen, die mit dem vorliegenden System abgeteuft werden, ein geringer Bohrfortschritt gemeinsam mit einem hohen Spülungsdruck notwendig ist.

Zusätzlich zu dieser Erkenntnis konnte herausgearbeitet werden, dass sich große Mehrausbrüche in den Bohrdaten durch einen rapiden Abfall des Spülungsdruckes auf unter 30 bar bei einem Normaldruck von etwa 100 bar ankündigen. Gleichzeitig bleibt die Bohrgeschwindigkeit gleich. Derartige Abfälle des Spülungsdruckes lassen sich auf eine starke Kommunikation des anstehenden Hohlraums mit der Bohrung zurückführen. So wird der Hohlraum mit Spülung aufgefüllt, bevor er von der eigentlichen Bohrung erreicht wird. Selbiges gilt für offene Klüfte in schwach verfestigten, gestörten Bereichen der Bohrung. Der in Abbildung 1.9 erkennbare Mehrausbruch machte sich wie in Tabelle 1.33 ersichtlich ist durch den rot markierten Abfall des Spülungsdruckes bemerkbar.

Eine weitere Erkenntnis, die aus der Betrachtung der Bohrdaten hervorging, war, dass ein geringer Bohrfortschritt gemeinsam mit einem hohen Spülungsdruck auf kompakte Gebirgsbereiche ohne nennenswerte Klüfte schließen lässt. Im Gegensatz dazu ist ein hoher Bohrfortschritt, der gemeinsam mit einem geringen Spülungsdruck auftritt, ein Zeichen für weiche Gebirgsabschnitte mit teilweise sehr großen Mehrausbrüchen. Dieser Umstand ist anhand der Mittelwerte, die für die jeweiligen Abschnitte definiert wurden, klar ersichtlich. Die Abhängigkeit der Bohrgeschwindigkeit vom Klüftzustand des Gebirges wurde in Teil 1 Abschnitt 2.3.2.2 bereits näher beschrieben.

Der Umstand, dass sich die untersuchten Bohrungen alle in sehr inhomogenen Abschnitten befanden, verkomplizierte die Auswertung und Analyse der Bohrdaten. Aus diesem Grund war es nicht möglich, längere Abschnitte mit gleich bleibenden Daten zu untersuchen.



Abb. 1.9: Zu den abgebildeten Bohrdaten gehörige Aufweitung des Bohrlochs (der rote Ring entspricht dem ursprünglichen Bohrlochdurchmesser) [87]

Tab. 1.33: Zu Abbildung 1.9 gehörigen Bohrdaten

Tiefe [m]	Fortschritt 1 [cm/min]	Fortschritt 2 [m/h]	Spüldruck [bar]
17,64	20,47	13,13	94,98
17,65	22,52	14,25	95,99
17,66	20,47	13,13	74,98
17,67	20,47	13,13	65,97
17,68	16,38	10,50	20,99
17,69	18,43	11,25	71,99
17,70	20,47	13,13	51,98
17,71	22,52	14,25	85,97
17,72	28,67	18,00	89,97
17,73	28,67	18,00	93,00

Ein großes Problem bei der Auswertung der Bohrdaten stellte die Größe der Vermessungsintervalle dar. In vielen Fällen lagen in einem Intervall kürzere Strecken aus sehr kompaktem Fels, in denen die Steuerung der Bohrung funktionieren würde. Diesen kurzen kompakten Strecken folgten in vielen Fällen stark entfestigte Zonen, die zu einem Abflachen des Bohrverlaufs führen. Derartige Bereiche werden nach dem derzeitigen Stand der Untersuchungen als Bereiche analysiert, in denen der Steuervorgang nicht erfolgreich war. Aus diesem Grund wurden die Ergebnisse teilweise verfälscht. Für spätere Untersuchungen wird vorgeschlagen, Vermessungssonden zu verwenden, die mindestens alle 10 cm Punkte aufzeichnen. Durch eine derartige Aufzeichnungsrate wäre es möglich, genauere Erkenntnisse zu gewinnen und diese zu belegen.

1.4.8 Anwendung der Ergebnisse aus der Analyse

Da weitere 3 Bohrungen in einem Abschnitt gebohrt wurden, der sich in der unmittelbaren Nähe der Abschnitte 3 und 6 befand, war es möglich die oben beschriebenen Erkenntnisse in diesem Abschnitt zu überprüfen. Hierfür wurden aus den Grenzwerten der beiden Abschnitte 3 und 6 die Mittelwerte für den Bohrfortschritt und den Spüldruck gebildet (siehe Tabelle 1.34). Diese Grenzwerte dienten den Bohristen als Richtwerte für jene Bereiche, in denen Steuermanöver ausgeführt werden sollen.

Tab. 1.34: Grenzwerte der Bereiche (Abschnitt 7)

Aus den Abschnitten 3 und 6 ermittelte Grenzen für die Bohrdaten			
Bereich		Bohrfortschritt [m/h]	Spüldruck [bar]
A	Kompaktes Gestein mit kleineren Klüften	<6,015	>96,294
B	Kompaktes geklüftetes Gestein mit kleineren Mehrausbrüchen	6,015 - 28,718	96,294 - 83,3715
C	Aufgelockertes Gestein mit großen Aufweitungen und Mehrausbrüchen	>28,718	<83,372

Tab. 1.35: Kombinierte Betrachtung der Bohrparameter (Bohrung 1)

Kombinierte Betrachtung der Bohrparameter									
	AA	BB	CC	AB	AC	BA	BC	CA	CB
Länge [m]	0,36 m	0,22 m	0,07 m	0,06 m	0,01 m	0,44 m	0,16 m	0,05 m	0,03 m
Anteile [%]	25,7 %	15,7 %	5,0 %	4,3 %	0,7 %	31,4 %	11,4 %	3,6 %	2,1 %

Nach dem Abschluss der ersten Bohrung wurde der für den Bohrfortschritt im Bereich A definierte Grenzwert in Rücksprache mit den Bohristen auf 10 m/h angehoben. Diese Maßnahme war notwendig, da festgestellt wurde, dass das Steuern in sehr harten Abschnitten nicht immer möglich war und es des Weiteren zu einer sehr hohen Anzahl an erfolgreichen Steuervorgängen im Bereich BA (31,4 %) gekommen ist (siehe Tabelle 1.35). Da eine genaue Begründung der erfolgreichen Steuervorgänge im Bereich BA nicht möglich ist, wurde versucht, diesen Bereich durch die Erhöhung des Grenzwertes des Bohrfortschritts für den Bereich A zu verkleinern. Das Problem in diesem Bereich ist, dass es einerseits zu Richtungsänderungen der Bohrung kommt, die durch das erfolgreiche Wegdrücken der Steuerleisten von der Bohrlochwand ermöglicht werden, jedoch auch zu unkontrollierten Richtungsänderungen in Bereichen, in denen sich Keile unter der Verrohrung ausbilden.

In Tabelle 1.36 sind die adaptierten Grenzwerte für die Bohrungen 2 und 3 dargestellt.

Die Auswertung jener Bereiche, in denen erfolgreich gesteuert wurde, ist in Tabelle 1.37 ersichtlich.

Aus der vorliegenden Auswertung für die Bohrungen 2 und 3 geht hervor, dass die Erhöhung des Grenzwertes des Bohrfortschritts für den Bereich A sinnvoll war. Dies wird durch die prozentuelle Zunahme der erfolgreichen Steuervorgänge im Bereich AA verdeutlicht. Allgemein konnte festgestellt werden, dass durch die Definition und Anwendung der Grenzwerte in diesem Abschnitt die Bohrungen mit einer viel höheren Genauigkeit als in den vorherigen Abschnitten abgeteuft werden konnten.

Die Bohrungen dieses Abschnitts haben gezeigt, dass die Definition von Grenzwerten in den Bohrdaten zu einer deutlichen Verbesserung des Steuerverhaltens von Bohrungen beiträgt, die mit

Tab. 1.36: Erhöhte Grenzwerte (Abschnitt 7)

Erhöhter Grenzwert der Bohrgeschwindigkeit für die Bohrungen 2 und 3 im Abschnitt 7			
Bereich		Bohrfortschritt [m/h]	Spülungsdruck [bar]
A	Kompaktes Gestein mit kleineren Klüften	<10,00	>96,294
B	Kompaktes geklüftetes Gestein mit kleineren Mehrausbrüchen	10,00 - 28,718	96,294 - 83,3715
C	Aufgelockertes Gestein mit großen Aufweitungen und Mehrausbrüchen	>28,718	<83,372

Tab. 1.37: Kombinierte Betrachtung der Bohrparameter (Bohrungen 2 und 3)

Kombinierte Betrachtung der Bohrparameter									
	AA	BB	CC	AB	AC	BA	BC	CA	CB
Länge [m]	0,71 m	0,19 m	0,15 m	0,13 m	0,18 m	0,38 m	0,19 m	0,01 m	0,00 m
Anteile [%]	36,6 %	9,8 %	7,7 %	6,7 %	9,3 %	19,6 %	9,8 %	0,5 %	0,0 %

dem untersuchten System abgeteuft werden. Diese Verbesserung lässt sich durch die Einschränkung der Steuervorgänge auf jene Bereiche erklären, in denen es zufolge der vorhergegangenen Auswertung zu erfolgreichen Steuermaßnahmen gekommen ist.

Kapitel 2

Ausblick

Das Fehlen von Referenzwerten für erfolgreiche Lenkmanöver stellte das Hauptproblem der gegenständlichen Auswertung dar. Weiters ist die minimal mögliche Aufzeichnungsrage, der Vermessungssonde, welche 0,4 m beträgt, eindeutig viel zu grob. Aus diesem Grund konnten Bereiche, in denen Lenkmanöver stattgefunden haben, oft nicht klar aus den Daten gefiltert werden, da es durch die großen Intervalle des Öfteren zu Überschneidungen der jeweiligen Bereiche kam.

Um genauere Aussagen zu den geologischen Eigenschaften des Gebirges anhand von Bohrdaten treffen zu können, bedarf es noch weiterer Untersuchungen. Ein erster Schritt, der zu qualitativ hochwertigen Aussagen führen würde, wäre ein Versuchsfeld in homogenen Formationen oder in Betonprobekörpern unterschiedlicher Festigkeiten. In derartigen Probekörpern wäre es möglich, den Zusammenhang zwischen dem Bohrfortschritt und der Festigkeit des anstehenden Materials zu untersuchen und somit einen der zwei aussagekräftigsten Parameter zu eichen. Im Anschluss daran könnten in einem Versuchsfeld die Grundvoraussetzungen, die an die Geologie gestellt werden müssen, festgelegt werden, um mit diesem System erfolgreiche Lenkmanöver ausführen zu können. Derartige Grundvoraussetzungen würden die Grenzwertfindung für die Anwendbarkeit dieses Systems um ein Vielfaches erleichtern.

Eine weitere Hilfestellung für eine qualitativ hochwertige Auswertung wären beispielsweise Druckversuche oder andere mechanische Versuche, anhand derer klare Korrelationen mit den Bohrdaten herausgearbeitet werden können. Derartige Versuche werden jedoch aus Kostengründen in den meisten Fällen nicht ausgeführt, da sich ihr Nutzen erst längerfristig offenbart. Für weitere Untersuchungen im Feld wird empfohlen, Messsonden zu verwenden, deren Messintervalle maximal 10 cm betragen. Dies würde zu einer genaueren Basis an zu untersuchenden Daten führen. In den meisten Fällen bedingt eine größere Menge an Rohdaten auch genauere Aussagen bei der Gegenüberstellung von Daten aus Bohrlochvermessungen mit Bohrdaten.

Literaturverzeichnis

- [1] M. R. Anderson. *HDD Solids Control Principals and Buyer´s Guide*. 2015. URL: <http://www.elginseparationsolutions.com/assets/principles-of-hdd-solids-control-and-buyers-guide-8-21-2015.pdf> (Zugriff am 26. 11. 2017).
- [2] W. Arnold. *Flachbohrtechnik*. Leipzig Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1993. ISBN: 978-3-342-00640-4.
- [3] Art of Directional Drilling. *SDMM - An Introduction*. 2015. URL: <https://directionaldrillingart.blogspot.co.at/2015/10/sdmm-introduction.html> (Zugriff am 16. 11. 2017).
- [4] Australian Drilling Industry Training Committee. *Drilling*. 4. ed. Boca Raton, Fla. [u.a.]: Lewis Publ. ISBN: 1566702429.
- [5] H. Bansen, A. Gerke und L. Herwegen. *Die Bergwerksmaschinen. Eine Sammlung von Handbüchern für Betriebsbeamte - Erster Band. Das Tiefbohrwesen*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2013. ISBN: 978-3-642-90834-7.
- [6] M. Barbanti, M. Bonanno und A. Rigazio. „Consolidation grouting using horizontal directional drilling technology in the Praga district of Warsaw prior to TBM tunneling“. In: *Geomechanics and Tunneling* (2014).
- [7] H. Batt, B. Goldfaden und B. Grimes. „Hughes Two-Cone Drill Bit“. In: *American Society of Mechanical Engineers* (2009).
- [8] H. J. Bayer. *HDD-Praxis-Handbuch - Grundlagen und vielfältige Anwendungen*. Vulkan Verlag, 2016. ISBN: 978-3-802-72804-4.
- [9] H. J. Bayer. *Praxishandbuch HDD-Felsbohrtechnik*. Vulkan-Verlag GmbH, 2013. ISBN: 978-3-802-72472-5.
- [10] H. J. Bayer und M. Reich. *Praxishandbuch HDD-Felsbohrtechnik*. Essen: Vulkan-Verlag, 2012. ISBN: 978-3-802-72769-6.
- [11] S. Berli und R. Pingel. „Anwendungen der modernen Tiefbohrtechnik in der Schweiz“. In: *Bulletin der Vereinigung Schweiz. Petroleum-Geologen und- Ingenieure* (1994).
- [12] C. Boley. *Handbuch Geotechnik - Grundlagen – Anwendungen - Praxiserfahrungen*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2012. ISBN: 978-3-834-88272-1.
- [13] Bospi AG. *PDC Meißel*. URL: http://www.bospi.ch/?inc=produkte/bohrmeissel/pdc_meissel.asp (Zugriff am 26. 10. 2017).
- [14] K. Boström. *Wasserbetriebene Bohrtechnik, optimal für die meisten Anwendungen*. URL: http://www.wassara.com/Documents/Wassara/Press/Water-powered%5C%20drilling/Water-powered-drilling_DE.rtf (Zugriff am 26. 11. 2017).
- [15] F. Braumann. „Horizontale Bohrtechnik“. In: *VÖBU-Bohrhandbuch*. VÖBU, 2012.
- [16] C. Brook. *Horizontal Directional Ground Investigation - Reducing Tunneling Risks by Minimising Geological Uncertainty*. 2013.

- [17] M. Bruce, B. David und C. Lewis. *Water Wells and Boreholes*. New York: John Wiley Sons, 2006. ISBN: 978-1-118-95169-9.
- [18] P. Buachacher und P. Dielacher. „Vollbohrtechnik“. In: *VÖBU-Bohrhandbuch*. VÖBU, 2012.
- [19] H. O. Buja. *Handbuch der Baugrunderkennung - Geräte und Verfahren*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2011. ISBN: 978-3-834-89994-1.
- [20] H. O. Buja. *Handbuch der Tief-, Flach-, Geothermie- und Horizontalbohrtechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011. ISBN: 978-3-834-89943-9.
- [21] H. O. Buja. *Ingenieurhandbuch Bergbautechnik - Lagerstätten und Gewinnungstechnik*. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag, 2013. ISBN: 978-3-410-22619-2.
- [22] H. Buja. *Spezialtiefbaupraxis Band 2 von 2: Grundlagen - Gerätetechnik - Anwendungen - Praxiserfahrungen*. Books on Demand, 2014. ISBN: 978-3-735-76616-8.
- [23] Bullock Museum. *Texas poor boy fishtail bit*. URL: <https://www.thestoryoftexas.com/discover/artifacts/texas-poor-boy-fishtail-bit> (Zugriff am 26. 11. 2017).
- [24] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. *Entwicklung und Erprobung eines EIV-Bohrkopfes für Tiefengeothermie*. 2010.
- [25] C. C. *Final Wall Stability in Metal Open Pit Mines Using Presplit Blasting*. URL: <http://slideplayer.com/slide/1678947/> (Zugriff am 26. 11. 2017).
- [26] M. Chan. „The Use of Horizontal Directional Coring Technique for Ground Investigation of Tunneling Projects in Hong Kong“. Diplomarbeit. University of Hong Kong, 2007.
- [27] J. Cunningham und R. Seit. *Horizontal Directional Coring (HDC) and Groundwater Inflow Testing for Deep Subsea Tunnels*.
- [28] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. / German Geotechnical Society; Deutsche Gesellschaft für Geowissen. *Empfehlung Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung - EA Geothermie*. New York: John Wiley Sons, 2015. ISBN: 978-3-433-60489-2.
- [29] Devico AS. *Directional Core Drilling*. URL: http://www.devico.com/site2017/wp-content/uploads/2015/08/Devico_DCD_web.pdf (Zugriff am 13. 11. 2017).
- [30] P. Dielacher. „Allgemeine Bohrkunde“. In: *VÖBU-Bohrhandbuch*. VÖBU, 2012.
- [31] P. Dielacher. „Erkundungsbohrungen“. In: *VÖBU-Bohrhandbuch*. VÖBU, 2012.
- [32] Drilljet AG. URL: <http://bauwelten.ch/drilljet.ch/pdf/1402581300-Gesteuerte%20Felsbohrungen.pdf> (Zugriff am 30. 10. 2017).
- [33] D. Ehrbar. *Geodätische Messtechnik*.
- [34] K. Eichler. *Fels- und Tunnelbau*. Kontakt & Studium Bd. 1. Expert-Verlag, 2000. ISBN: 978-3-816-91741-0.
- [35] L. Elbe. *Bohrspülungen im HDD*. Essen: Vulkan-Verlag GmbH, 2003. ISBN: 978-3-802-75386-2.
- [36] F. Eschke und W. Vorhoff. *Moderne Richtbohrtechnik im Fels- und Spezialtiefbau*. 2004. URL: https://www.baumaschine.de/baumaschine/wissensportal-archiv/2004-03/maschinen-und-geraete/richtbohrtechnik_dateien/richtbohrtechnik.pdf (Zugriff am 02. 12. 2017).
- [37] Faudi. *Hydrozyklonanlage*. URL: <http://www.faudi.de/hydrozyklonanlage.html> (Zugriff am 26. 11. 2017).

- [38] E. G. Fengler und S. Bunger. *Grundlagen der Horizontalbohrtechnik*. Essen: Vulkan-Verlag GmbH, 2007. ISBN: 978-3-802-75325-1.
- [39] M. Filliponi. „Die Interpretation von MWD-Daten im Sprengvortrieb als effiziente Methode zur Optimierung des Vortriebs. aufgezeigt am Beispiel des Subseattunnelbaustelle Solbakk in Norwegen“. In: (2015).
- [40] geodz. *Rotary-Bohrverfahren*. URL: <http://www.geodz.com/deu/d/Rotary-Bohrverfahren> (Zugriff am 26. 11. 2017).
- [41] geodz. *Saugbohrverfahren*. URL: <http://www.geodz.com/deu/d/Saugbohrverfahren> (Zugriff am 26. 11. 2017).
- [42] G. Girmscheid. *Studienblätter zur Vorlesung Bauverfahren, des Spezialtiefbaus - Teil 7: Bohren im Fels*. Zürich, 2013.
- [43] Glötzl Baumaßtechnik. *Ketten - Neigungsmessgeräte für vertikale oder horizontale Deformationsmessungen*.
- [44] J. Goldbrunner. „Tiefbohrtechnik“. In: *VÖBU-Bohrhandbuch*. VÖBU, 2012.
- [45] H. Graf. „Bohrverfahren im Fels“. In: *62. Deutsche Brunnenbautage und BAW-Baugrundkolloquium*. 2011.
- [46] Halco Rock Tools. *A-Z of drilling*. URL: <http://www.halco.uk/support> (Zugriff am 26. 11. 2017).
- [47] P. Hatzsch. *Tiefbohrtechnik*. Stuttgart: Enke, 1991. ISBN: 978-3-432-99511-3.
- [48] *Imprägnierter Diamantmeißel*. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Impr%C3%A4gnierter_Diamantmei%C3%9Fel.jpg (Zugriff am 26. 11. 2017).
- [49] D. Jenne. *Imlochhammer*. DE Patent App. DE1,996,152,530. 1998. URL: <https://encrypted.google.com/patents/DE19652530A1?cl=de> (Zugriff am 26. 11. 2017).
- [50] H. Jodl. *Studienblätter zur Vorlesung Bauverfahren, im Spezialtiefbau - Teil 1.6: Stützsuspensionen*. Wien, 2011.
- [51] H. Jodl. *Studienblätter zur Vorlesung Bauverfahren, im Spezialtiefbau - Teil 4.1.2.1: Bohrtechnik*. Wien, 2011.
- [52] P. Johansson. „Straight foward drilling“. In: *LKAB Wassara AB*. 2014.
- [53] A. Kainrath, H. Krenn und D. Adam. „Die Injektionstechnik auf dem Prüfstand“. In: *2. Symposium Baugrundverbesserung in der Geotechnik* (2012).
- [54] R. Katzenbach und S. Leppla. *Handbuch des Spezialtiefbaus - Geräte und Verfahren*. Köln: Bundesanzeiger Verlag GmbH, 2015. ISBN: 978-3-846-20377-4.
- [55] U. Kirsten. „Beitrag zur energetischen und tribologischen Untersuchung von Gesteinsbohrprozessen“. Dissertation. Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2014.
- [56] H. Knitsch und P. Pandrea. „Bohrlochabweichung und Bohrlochvermessung“. In: *15. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium* (2008).
- [57] K. Kogler und H. Krenn. „Bohrtechnische Verfahren zur Erkundung der Gebirgs- und Bergwasserverhältnisse im Zusammenhang mit TVM-Vortrieben“. In: *Geomechanics and Tunneling 7* (2014).
- [58] H. Konietzky. *Overview about Rock Drilling*. 2017.
- [59] G. Kunze, H. Göhring und K. Jacob. *Baumaschinen - Erdbau- und Tagebaumaschinen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011. ISBN: 978-3-834-81592-7.

- [60] C. Kutzner. *Injektionen im Baugrund*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1991. ISBN: 978-3-432-98901-3.
- [61] W. Lederer. „Analytische Untersuchung der Gesteinslöseprozesse als Grundlage für die Optimierung von Bohrmeißeln“. Diplomarbeit. TU Wien, 2011.
- [62] B. Longyear. *Reducing Drill Hole Deviation*. URL: <https://www.boartlongyear.com/insite/how-to-reduce-drill-hole-deviation/#download-anchor> (Zugriff am 16.10.2017).
- [63] B. Maiwald und M. Krentz. „Sanierung eines Setzungsschadens an der ICE- Hochgeschwindigkeitsstrecke Berlin- Hannover“. In: *Eisenbahningenieur* (2002).
- [64] C. Martin. *Doppelkernrohr*. URL: <http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/doppelkernrohr/3418> (Zugriff am 26.11.2017).
- [65] C. Martin. *Einfachkernrohr*. URL: <http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/einfachkernrohr/3766> (Zugriff am 26.11.2017).
- [66] J. Meyers. *Meyers Großes Konversations-Lexikon Band 19*. Bibliographisches Institut, 1909.
- [67] P. Milenz und O. Milenz. *Polymere für Stützflüssigkeiten im Spezialtiefbau*. URL: http://www.gwe-gruppe.de/export/shared/documents/pdf/bre/gwe/bbr_08-2016_Polymere_fuer_Stuetzfluessigkeiten.pdf (Zugriff am 26.11.2017).
- [68] Mincon Downhole Tools. *Positive Displacement Motors (PDM)*.
- [69] Mincon Drilling. *Electronic Multishot System (EMS)*.
- [70] E. Nehybova. „Orientierungsversuche mit dem TU-Abrasimeter zur Untersuchung von Lockergesteinsabrasivität“. Diplomarbeit. TU Wien, 2011.
- [71] K. Obuchowska. „The application of Wassara Hammer and Mudmotor steering drilling methods“. Diplomarbeit. Halmstad University, Sweden, 2013.
- [72] A. M. Paiaman, M. K. Ghassem Al-Askari, B. Salmani, B. D. Al-Anazi und M. M. *Effect of Drilling Fluid Properties on Rate of Penetration*. 2009.
- [73] S. Passarge und B. Müller. „Wehrhahn-Linie in Düsseldorf: Stationsneubau unter dem Gebäude des Kaufhofs im Schutze einer Vereisung“. In: *Beiträge zum 12. Geotechnik-Tag in München* (2013), S. 127–137.
- [74] G. Pirkel. *Tiefbohrgeräte*. Wien: Springer, 1957. ISBN: 978-3-432-99511-3.
- [75] H. Prinz und R. Strauss. *Ingenieurgeologie (German Edition)*. Spektrum Akademischer Verlag, 2012. ISBN: 3827424720.
- [76] S. Raffler. „Erstellen einer Studie zur Umsetzung innovativer Ideen bei der Erkennung des Bohrlochverlaufes von Sprengbohrungen in Echtzeit“. Bachelorarbeit. Montanuniversität Leoben, 2011.
- [77] *Recycling mit System von HDD-Bohrspülungen*. URL: https://www.tracto-technik.de/doks/pdf/Prosp_AMC-Recycling_2017_DE.pdf (Zugriff am 26.11.2017).
- [78] M. Reich. *Auf Jagd im Untergrund - Mit Hightech auf der Suche nach Öl, Gas und Erdwärme*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2015. ISBN: 978-3-662-46282-9.
- [79] S. Röntzsch. „Bohrtechnische Erschließung submariner Gashydratlagerstätten“. Dissertation. Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2014.
- [80] C. C. Scharpenberg. *Fluid-operated well-drilling apparatus*. US Patent 1,482,702. URL: <https://www.google.at/patents/US1482702> (Zugriff am 26.11.2017).

- [81] A. Schwäbe. *Bohrspülungen im HDD-Verfahren*. 2012.
- [82] Semmering-Basistunnel neu Baulos SBT3.1 - Tunnel Grautschenhof Ausschreibungsprojekt. *Teil 3.2.2 Anhang 05 Technische Vertragsbedingungen für Tunnel und Querschlüge in geschlossener Bauweise mit zyklischem Vortrieb*.
- [83] R. K. Singhal. *Mine Planning and Equipment Selection 1998*. Boca Raton, Fla: CRC Press, 1998. ISBN: 978-9-058-09011-9.
- [84] M. Sohmer. „Untersuchung zur Anwendbarkeit des Phased Array Prinzips für die seismische Vorauserkundung in gerichteten Tiefbohrungen“. Dissertation. Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2012.
- [85] Solexperts AG. *Borehole Measurement*. URL: http://www.solexperts.com/index.php/de/component/docman/doc_view/784-en12geoboehrlochvermessv6.html (Zugriff am 26.10.2017).
- [86] E. Tentschert. „Geologie“. In: *VÖBU-Bohrhandbuch*. VÖBU, 2012.
- [87] Terrascan Geophysik Bohrlochmessungen GmbH. *Geophysikalische Bohrlochversuche*.
- [88] K. Thuro. „Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb Geologisch-felsmechanische Untersuchung anhand sieben ausgewählter Tunnelprojekte“. In: *Münchner Geologische Hefte Reihe B: Angewandte Geologie* (1996).
- [89] K. Thuro. *Drillability prediction - geological influences in hard rock drill and blast tunneling*. 1996.
- [90] K. Thuro. „Geologisch-felsmechanische Grundlagen der Gebirgslösung im Tunnelbau“. Habilitation. Technische Universität München, 2001.
- [91] K. Thuro. „Geologisch-felsmechanische Untersuchungen zur Bohrbarkeit von Festgesteinen beim konventionellen Bohr- und Sprengvortrieben anhand von ausgewählten Tunnelprojekten“. In: *9: Nationale Tagung für Ingenieurgeologie* (1993), S. 125–134.
- [92] H. Tudeschki und T. Hardebusch. „Direkte Lagerstättenerkundung“. In: *Advanced Mining Solutions*.
- [93] Umwelt NRW. *Gutachten Fracking NRW*. 2012. URL: https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/PDFs/umwelt/gutachten_fracking_nrw_2012_lang_03.pdf (Zugriff am 26.11.2017).
- [94] H. Wannenmacher, R. Pfeffer und B. Christöphl. „Baulos SBT 3.1: Bohr- und Injektionsarbeiten für den Schacht Sommerau 2“. In: *66. Geomechanik Kolloquium. Spezialseminar: Injektionen* (2017).
- [95] M. Willner und M. Wenke. „Statentunnel in Rotterdam - Ausführungserfahrungen von Vereisungsbohrungen un der Vereisung von Querschlügen“. In: *Geomechanics and Tunneling* (2008).
- [96] K. J. Witt. *Grundbau-Taschenbuch - Teil 2: Geotechnische Verfahren*. New York: John Wiley & Sons, 2010. ISBN: 978-3-433-60056-6.
- [97] V. Wittig, J. und z. „Hydraulic DTH/Mud Hammer with Recirculation Capabilities to Improve ROP and Hole Cleaning For Deep, Hard Rock Geothermal Drilling“. In: *Proceedings World Geothermal Congress 2015*.
- [98] D. Zou. *Theory and Technology of Rock Excavation for Civil Engineering*. Springer Singapore, 2016. ISBN: 978-9-811-01988-3.

-
- [99] ZÜBLIN Spezialtiefbau Ges.m.b.H. *DRILL-PILOT Bohrlochsteuerung und Vermessung*. URL: [http://www.insond.com/databases/internet/_public/files.nsf/SearchView/784374D727DA70ECC12579E200474508/\\$File/37249694.pdf](http://www.insond.com/databases/internet/_public/files.nsf/SearchView/784374D727DA70ECC12579E200474508/$File/37249694.pdf) (Zugriff am 26.10.2017).
- [100] Züblin Spezialtiefbau Ges.mb.H. *Gerätedatenblatt Bohrdatenerfassung*.

Abbildungsverzeichnis

1.1	„Fishtailbit“ [23]	19
2.1	Allgemeiner Aufbau eines Einfachkernrohrs (links) und eines Doppelkernrohrs (rechts)	26
	a Einfachkernrohr [65]	26
	b Doppelkernrohr [64]	26
2.2	Dreifachkernrohr [19]	27
2.3	Seilkernrohr [20]	28
2.4	Reißende Gesteinszerstörung [20]	29
2.5	Hohlbohrschnecke mit abstoßbarer Spitze (links), Hohlbohrschnecke für Kernbohrungen (mitte) und Komponenten des SPT Tests [4]	30
2.6	Phasen der Gesteinszerstörung mit Rollenmeißeln [55]	31
2.7	Aufbau eines Rollenmeißels [20]	32
2.8	Offset von Rollenmeißeln [93]	32
2.9	Rollenmeißel für weiche, mittlere und harte Formationen [93]	33
2.10	Gesteinszerstörung [58]	34
2.11	Riefenbildung unter einem Diamantkorn aus: [20]	35
2.12	Oberflächenbesetzte Meißel [93]	36
2.13	PDC-Meißel aus: [13]	36
2.14	Imprägnierter Diamantmeißel [48]	37
2.15	Dreh-schlagende Gesteinszerstörung [88]	39
2.16	Kerbende Gesteinszerstörung [58]	40
2.17	Abläufe bei Imlochhammerbohren mit Luft aus: [46]	41
2.18	Gesteinslösung beim schlagenden Bohren [4]	44
2.19	direktes Spülbohrverfahren (links [40]) und indirektes Spülbohrverfahren (rechts [41])	44
2.20	Vergleich der Quellfähigkeit von Na-Bentonit und Ca-Bentonit [35]	48
2.21	Spülungskreislauf [77]	51
2.22	Spülsaufbereitungsanlagen abhängig von der Kornfraktion [20]	51
2.23	Wirkungsweise eines Hydrozyklons [37]	53
2.24	Gegenstromzentrifuge [20]	54
2.25	Spannungs-Verformungsdiagramm eines spröden und eines zähen Prüfkörpers [91]	56
2.26	Versuchsaufbau für den Cerchar-Abrasivitätstest und die damit erzeugten Ritzspuren [75]	57
2.27	Abhängigkeit der Bohrgeschwindigkeit vom Abstand der Klüfte [88]	58
2.28	Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit sowie der spezifischen Zerstörungsarbeit von der Einfallrichtung der Schieferungsflächen [88]	59
2.29	Trennflächengefüge im Fels [86]	61
2.30	Bohrlochverlauf einer HDD Bohrung in stark zersetztem Granit [26]	63
2.31	Setzungsbedingte Abweichung einer Bohrung nach oben [62]	63
2.32	Bohrlochabweichung in Abhängigkeit von der Fehlstellung der Lafette [28]	64
2.33	Bohrlochabweichung infolge der Rotation des Bohrkopfs nach [62]	65

2.34	Abweichung geneigte Bohrlöcher nach [4]	66
2.35	Unterschiedliche Anordnung von Stabilisatoren nach [2]	68
2.36	Verschiedene Typen von Stabilisatoren [19]	68
3.1	Optische Bohrlochvermessung [56].	72
3.2	Walk-Over-Verfahren [8]	73
1.1	Vergleich der mit den unterschiedlichen Hammersystemen generierten Abweichungen [25]	77
1.2	Vergleich der Bohrzeit von Bohrungen mit Doppelkernrohr und Seilkernrohr [11]	79
1.3	Vergleich der Bohrgeschwindigkeit von luft- und wasserbetriebenen Imlochhäm- mern nach: [97]	81
1.4	Vergleich der Bohrlochabweichungen von luft- und wasserbetriebenen Imlochhäm- mern nach: [97]	81
1.5	Vergleich des Energieverbrauchs von luft- und wasserbetriebenen Imlochhäm- mern [97]	82
2.1	Vergleich der Aussagekraft von vertikalen und horizontalen Bohrungen aus: [27]	84
2.2	Komponenten gesteuertes Kernbohrsystem aus: [27]	85
2.3	Bohrverlauf gesteuerte Seilkernbohrung Singapur [16]	86
2.4	Steuern einer Bohrung mit Ablenkleisten	87
2.5	Exzentrische Lagerung des Innengestänges [36]	88
2.6	Die wichtigsten Bestandteile eines MUD-Motors nach:[3]	90
2.7	Zusammenhang zwischen Rotationsgeschwindigkeit und Drehmoment nach: [3]	91
2.8	Bohrprinzipien eines MUD- Motors [84]	92
2.9	Idealisiertes Modell eines voll stabilisierten MUD-Motors [79]	93
2.10	Bohrstrang mit Rotary Steerable System [36]	95
2.11	Universalbohrkopf oben und Sandbohrkopf unten [38]	96
2.12	Verfahrensschritte Jetten nach: [79]	97
1.1	Software Exges der Firma Züblin	102
1.2	Komponenten der Bohrdatenerfassung und ihre Anordnung am Bohrerät [100]	103
1.3	Auswertungsprotokoll einer Bohrlochvermessung	104
1.4	Grafische Auswertung einer Bohrlochvermessung	105
1.5	Optische Merkmale des Gebirgsbereichs A (der rote Ring stellt das ursprüngliche Bohrloch dar) [87]	108
1.6	Optische Merkmale des Gebirgsbereichs B (der rote Ring stellt das ursprüngliche Bohrloch dar) [87]	108
1.7	Optische Merkmale des Gebirgsbereichs C (der rote Ring stellt das ursprüngliche Bohrloch dar) [87]	109
1.8	Korrelation zwischen dem Bohrfortschritt und dem Spüldruck	110
1.9	Zu den abgebildeten Bohrdaten gehörige Aufweitung des Bohrlochs (der rote Ring entspricht dem ursprünglichen Bohrlochdurchmesser) [87]	120

Tabellenverzeichnis

2.1	Zulässige Abweichung von gesteuerten Seilkernbohrungen nach: [29]	85
1.1	Auswertung der Bohrdaten	107
1.2	Auswertung der Vermessungsdaten	107
1.3	Mittelwerte der Bohrdaten in den definierten Bereichen (Abschnitt 1)	110
1.4	Grenzwerte der Bereiche (Abschnitt 1)	111
1.5	Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Bohrfortschritts (Abschnitt 1) . .	111
1.6	Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Spülungsdrucks (Abschnitt 1) . .	111
1.7	Auswertung nach der kombinierten Betrachtungsweise (Abschnitt 1)	111
1.8	Mittelwerte der Bohrdaten in den definierten Bereichen (Abschnitt 2)	112
1.9	Grenzwerte der Bereiche (Abschnitt 2)	113
1.10	Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Bohrfortschritts (Abschnitt 2) . .	113
1.11	Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Spülungsdrucks (Abschnitt 2) . .	113
1.12	Auswertung nach der kombinierten Betrachtungsweise (Abschnitt 2)	113
1.13	Mittelwerte der Bohrdaten in den definierten Bereichen (Abschnitt 3)	114
1.14	Grenzwerte der Bereiche (Abschnitt 3)	114
1.15	Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Bohrfortschritts (Abschnitt 3) . .	115
1.16	Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Spülungsdrucks (Abschnitt 3) . .	115
1.17	Auswertung nach der kombinierten Betrachtungsweise (Abschnitt 3)	115
1.18	Mittelwerte der Bohrdaten in den definierten Bereichen (Abschnitt 4)	115
1.19	Grenzwerte der Bereiche (Abschnitt 4)	116
1.20	Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Bohrfortschritts (Abschnitt 4) . .	116
1.21	Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Spülungsdrucks (Abschnitt 4) . .	116
1.22	Auswertung nach der kombinierten Betrachtungsweise (Abschnitt 4)	116
1.23	Mittelwerte der Bohrdaten in den definierten Bereichen (Abschnitt 5)	117
1.24	Grenzwerte der Bereiche (Abschnitt 5)	117
1.25	Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Bohrfortschritts (Abschnitt 5) . .	117
1.26	Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Spülungsdrucks (Abschnitt 5) . .	117
1.27	Auswertung nach der kombinierten Betrachtungsweise (Abschnitt 5)	117
1.28	Mittelwerte der Bohrdaten in den definierten Bereichen (Abschnitt 6)	118
1.29	Grenzwerte der Bereiche (Abschnitt 6)	118
1.30	Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Bohrfortschritts (Abschnitt 6) . .	118
1.31	Zuordnung zu den Bereichen A-C auf Basis des Spülungsdrucks (Abschnitt 6) . .	119
1.32	Auswertung nach der kombinierten Betrachtungsweise (Abschnitt 6)	119
1.33	Zu Abbildung 1.9 gehörigen Bohrdaten	120
1.34	Grenzwerte der Bereiche (Abschnitt 7)	121
1.35	Kombinierte Betrachtung der Bohrparameter (Bohrung 1)	121
1.36	Erhöhte Grenzwerte (Abschnitt 7)	122
1.37	Kombinierte Betrachtung der Bohrparameter (Bohrungen 2 und 3)	122