

Zeitschrift: Tec21
Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Band: 133 (2007)
Heft: 11: Energie aus der Tiefe

Artikel: Technik für tiefe Bohrungen
Autor: Rota, Aldo / Macek, Andreas / Wyss, Roland
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-108090>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

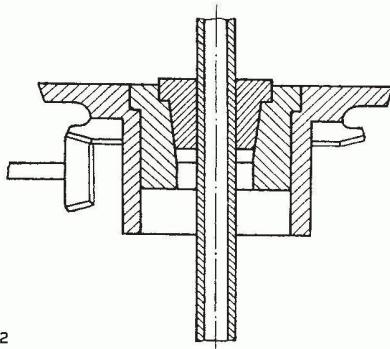
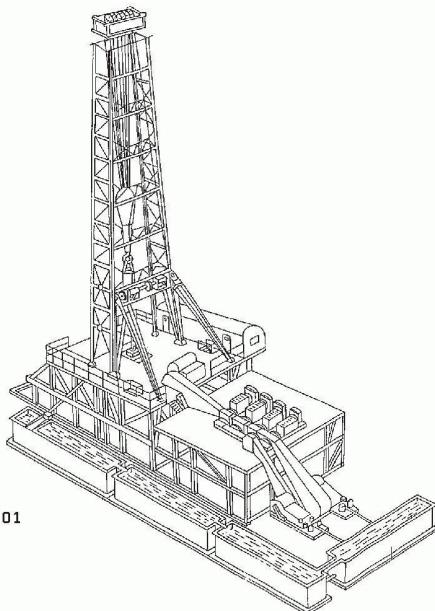
Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 16.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

TECHNIK FÜR TIEFE BOHRUNGEN



Zur Deckung des zunehmenden globalen Bedarfs an fossilen Energieträgern hat die Technologie für die Herstellung tiefer Bohrungen in den letzten Jahren grosse Fortschritte gemacht. Damit sind die Voraussetzungen für die Nutzung geothermischer Potenziale in grosser Tiefe heute gegeben.

Die Technik und die Gerätschaften zum Abteufen von Geothermiebohrungen beruhen auf den jahrzehntelangen Erfahrungen und Entwicklungen der Erdöl/Erdgas fördernden Industrie. Für die Herstellung eines Bohrlochs müssen, unabhängig vom Zweck, drei Teilaufgaben erfüllt werden:

- Zerstörung des Gesteins an der Bohrlochsohle
- Reinigung der Bohrlochsohle und Austragen des zerbohrten Gesteins
- Abstützung der Bohrlochwand gegen Nachfall, plastische Verformung, Zusammenbruch des Bohrlochs, Einströmen von Fluiden (Wasser, Sole) etc.

BOHRVERFAHREN

Heute werden praktisch alle tiefen Bohrungen nach dem Rotary-Bohrverfahren durchgeführt. Eine Rotary-Bohranlage (Bilder 1 und 4) besteht im Wesentlichen aus Bohrturm, Antriebsaggregaten (Diesel oder elektrisch), Drehtisch, Hebwerk, Bohrgestänge, Bohrwerkzeugen, Spülungssystem und bei Bedarf Blowout-Preventer (verhindert den Austritt von Fluiden am Bohrlochkopf). Dabei wird das gesamte Bohrgestänge inklusive Meissel durch den sogenannten Drehtisch permanent gedreht. Das Antriebsdrehmoment wird durch formschlüssige Einsätze im Drehtisch auf eine sechskantige Mitnehmerstange (Kelly-Stange) als oberstes Element des Bohrstranges übertragen (Bild 2). Schwerstangen, d.h. dickwandige Bohrrohre unmittelbar über dem Meissel, tragen dazu bei, dem Meissel genügend Andruck zu verleihen und den Bohrstrang ständig unter Zugspannung zu halten. Vorschub- und Nachlasseinrichtungen regulieren hydraulisch oder mechanisch die Vorschubkraft und -geschwindigkeit des Bohrgestänges. Das Bohrgerüst (Bohrturm) wird für das Halten der Bohrgarnitur, den Ein- und Ausbau der Bohrgestänge und Verrohrungen, die Führung des Gestänges und diverse unterstützende Funktionen verwendet. Moderne Tiefbohranlagen sind heute fast ausschliesslich mit einem zusätzlichen Top-Drive als Hauptrotationsantrieb ausgerüstet. Diese hydraulischen oder elektrischen Antriebe sind über die gesamte freie Arbeitshöhe des Turmgerüsts in Schienenbahnen bewegbar und werden direkt mit dem Bohrgestänge verschraubt. Sie erlauben präzisere und vielseitigere Arbeitsmanöver beim Bohrvorgang als herkömmliche Drehtischantriebe.

DIAMANTEN ODER ZÄHNE

Das wichtigste Werkzeug bei einer Tiefbohrung ist der Bohrmeissel, bei dem zwei Bauarten unterschieden werden. Das gebräuchlichste Gerät, der Rollenmeissel, wird meist mit drei Rollen hergestellt (Bilder 3 und 5). Die Rollen sind mit Zähnen besetzt, die aus gehärtetem Stahl (Zahnmeissel oder Rock Bit) oder Wolframkarbid (Warzenmeissel oder Tungsten Carbide Insert Bit) gefertigt sind. Das Gestein wird dabei durch eine kombinierte Schlag- und Scherwirkung erbohrt. Das andere Prinzip, die Fixed Cutter Bits, sind Meissel, die üblicherweise mit Naturdiamanten besetzt sind (Diamantmeissel). Sie kommen für Bohrungen in extrem harten Gesteinsschichten wie

01 Schematische Darstellung einer Rotary-Tiefbohranlage mit Dieselantrieb (Bilder: Roland Wyss)

02 Schema eines Drehtisches (Querschnitt). Die sechseckige Mitnehmerstange (Kelly) in der Mitte bewegt sich mit dem Bohrgestänge in vertikaler Richtung



03 Dreirollenmeissel mit Hartmetallstiften (Warzenmeissel) vor dem Einfahren ins Bohrloch. Aus den Spüldüsen tritt Spülung aus. Oberhalb des Meissels ist im Bohrgestänge ein Stabilisator (mit Hartmetallplättierung) angeordnet (Bilder: Andreas Macek)

z.B. Granit zum Einsatz. Eine heute gängige Weiterentwicklung ist der PDC-Meissel (Polycrystalline Diamond Compact). Seine relativ grossen Schneidelemente sind mit synthetischen Diamantschichten belegt (Bilder 6 und 7). Dieser Typus wurde ursprünglich nur in sehr weichem Gebirge eingesetzt, heutige PDC-Meissel sind aber fähig, auch mittelhartes Gebirge zu erbohren. Die Wirkungsweise von Diamantmeisseln entspricht prinzipiell der des Schleifens, PDC-Meissel zerstören das Gebirge nach einem spanabhebenden Verfahren. Die Bohrdurchmesser von ultratiefen Bohrungen bewegen sich zwischen ca. 100 cm (Anfangsdurchmesser) und 15 cm (Enddurchmesser).

KRAFTÜBERTRAGUNG

Das Bohrgestänge ist das Verbindungsglied zwischen der Bohranlage und dem Bohrwerkzeug und hat verschiedene Funktionen:

- Übertragung des Drehmoments auf das Bohrwerkzeug
 - Belastung des Bohrwerkzeugs
 - Zirkulation der Spülung
 - spezielle Arbeiten wie Zementation, Einbau von Ausrüstung, Fangarbeiten
- Dementsprechend erfährt das Gestänge vielfältige Beanspruchungen durch Zug, Druck, Torsion, Biegung, Abnutzung und auch durch Resonanzschwingungen. Gestängebrüche oder aufgeschraubte Gestänge sind daher in der Praxis keine Seltenheit und können zu Verzögerungen wegen Fangarbeiten oder zum Verlust des Bohrlochs führen. In der Tiefbohrtechnik kommen meist geschraubte Gestängegarnituren zum Einsatz.
- Neben den Bohrstangen setzt sich ein Bohrstrang aus weiteren Elementen zusammen: Schwerstangen zur Belastung des Bohrmeissels, Stabilisatoren (Bild 9), Stossdämpfern, Räumgeräten, Gestängeprotektoren etc. Der unterste Teil eines Bohrstrangs (untertägige Bohrgarnitur) hat je nach Zusammenstellung der einzelnen Elemente andere Eigenschaften in Bezug auf die Richtungsstabilität:
- Pendelartige Garnituren ermöglichen einen optimal vertikalen Verlauf des Bohrlochs.
 - Voll stabilisierte Garnituren ermöglichen einen geraden und gleichmässigen Verlauf des Bohrlochs.
 - Ablenkgarnituren ermöglichen eine Ablenkung der Bohrung in verschiedene Richtungen.

SPÜLEN UND DICHTEN

Tiefe Bohrungen können nur durch Bohrverfahren mit Spülung bzw. Umkehrspülung erzeugt werden. Die Spülung dient dem Abtransport des Bohrkleins (Cuttings), der Kühlung und Schmierung des Bohrwerkzeugs, der Reinigung der Bohrlochsohle und der Abdichtung und Stützung des Bohrlochs. Je nach Bohrverfahren treibt die Spülung auch kleine Turbinen oder Schraubenmotoren von Bohr aggregaten an der Bohrlochsohle an (Bohrlochsohlenantrieb). Das erbohrte Gebirgsmaterial wird im Ringraum zwischen Gebirge und Bohrgestänge durch die Bohrspülung nach oben abtransportiert und in Reinigungsanlagen (Schüttelsieben und Zentrifugen) aus der Bohrspülung abgetrennt. Mehrere Hochleistungskolbenpumpen halten den permanenten Zirkulationskreislauf über den Bohrstrang, den Bohrmeissel, den Ringraum, die Feststoffabtrennungseinheiten und die Tankanlage aufrecht.

Als Bohrspülungen werden thixotrope Flüssigkeiten verwendet, die z. B. auf einer Wasser-Ton- oder einer reinen Polymerbasis aufbauen. Vereinfacht können thixotrope Flüssigkeiten dadurch beschrieben werden, dass sie dünnflüssiger werden, wenn man sie bewegt. Bei Stillstand verfestigen sie sich wieder. Ihre Zusammensetzung und ihre rheologischen Eigenschaften werden ständig den Bohrumständen und den geologischen Gebirgseigenschaften angepasst. Die thixotrope Eigenschaft der Bohrspülung verhindert dabei im Falle von Pumpenstillständen das Sedimentieren des im Ringraum befindlichen Bohrkleins, was zu einem Feststecken und schlimmstenfalls zum Verlust des Bohrstranges führen könnte. Auch mit der Zugabe von Bentoniten können die chemischen und die physikalischen Eigenschaften der Spülung beeinflusst werden. Insbesondere bilden Bentonite eine Gerüststruktur, die zum Wachstum eines Filterkuchens auf der Bohrloch-



04

wand führt (Bild 10) . Auch Zusätze von Polymeren und Zellulose ergeben Filterkuchen mit erhöhter elastischer Abdichtung der Bohrlochwand.

INNENAUSBAU IN STAHL UND ZEMENT

Um das Bohrloch über längere Strecken zu stabilisieren, wird es abschnittsweise und entsprechend den geologischen und hydraulischen Bedingungen der durchbohrten Gesteinsformationen teleskopartig mit Stahlrohren ausgebaut (Bild 12). Diese sogenannten Futterrohre (Casings) werden beim Einbau zusammengeschweisst oder verschraubt. Der Ringraum zwischen den Futterrohren und dem Gebirge wird mit Spezialzementen verfüllt. Dabei wird der Zement über die eingebauten Futterrohre, die an ihrem unteren Ende mit Rückschlagventilen ausgestattet sind – oder auch mittels Adapter zu diesen Rückschlagventilen über das Bohrgestänge –, in den Ringraum der Futterrohre bis zur Oberfläche eingepumpt. Am Ende dieser Operation bestehen ein vollständig verfüllter Ringraum und ein lediglich kurzes Zementstück im Inneren der Futterrohre, das zusammen mit den Rückschlagventilen vor dem Weiterbohren mit einem kleineren Bohrdurchmesser ausgebohrt wird. Die aufeinanderfolgenden sogenannten Rohrtouren werden ihrer Funktion entsprechend bezeichnet:

- Das Standrohr ist wenige Meter tief und dient zur Absicherung der obersten Lockergesteinszone, zum Schutz der Fundamente vor Unterspülung und als Führung.
- Die einzementierten Ankerrohre dienen zur Aufnahme der Sicherheitsarmaturen und als Führung zur Einhaltung der vorgegebenen Bohrrichtung.
- Die technischen Rohrtouren und Zwischenverrohrungen sind bis in die vorhergehende Rohrtour zementiert und werden zur Beherrschung geologischer Schwierigkeiten eingebaut.
- Die Endverrohrung bzw. die Produktionsrohrtour ist eine meist mit einer Filterstrecke versehene, zementierte oder freie Rohrtour, die aus verschiedenen Materialien bestehen kann.
- Eine verlorene Rohrtour (Liner) wird nicht bis zutage geführt, sondern in die letzte Verrohrung eingehängt. Sie kann ebenfalls aus verschiedenen Materialien bestehen.
- Die Förderrohrtour (Tubbing) wird in die Produktionsrohrtour eingebaut und dient zu deren Schutz.

GELENKTES BOHREN

Um die Neigung und die Richtung einer Bohrung zu kontrollieren und zu steuern, werden Bohrlochmotoren in Kombination mit MWD-Systemen (Measurement While Drilling) eingesetzt. Dabei befindet sich direkt hinter dem Bohrmeissel ein Untertagemotor (PDM, Positive Displacement Motor), der im Prinzip als umgekehrte Pumpe funktioniert und in den ein einstellbares Knickstück integriert ist. Dieser Motor wird durch den Bohrspülungsstrom innerhalb des Bohrgestänges angetrieben. Bei stillstehendem Bohrstrang wird damit lediglich der Bohrmeissel in Rotation versetzt, der mit Hilfe des Kippmoments des Knickstückes eine Richtungsänderung der Bohrspur vollzieht. Durch eine abwechselnde Folge aus Bohren mit stillstehendem Bohrstrang und somit ausschliesslichem Bohren mit dem Bohrmotor sowie dem überlagerten Bohren mit Bohrmotor und gleichzeitig rotierendem Bohrstrang kann jede gewünschte Bohroneigung und -richtung erzielt werden. Richtungsänderungen mit extremen Radien von 30 m und weniger sind heute realisierbar (Bilder 8 und 11).

MWD-Geräte, die über dem Motor im Bohrgestänge eingebaut sind, messen mittels eines elektronischen Gyro-Kompasses die Neigung und Richtung des Werkzeuges und übermitteln diese Daten in Form von positiven Druckimpulsen permanent über den Spülungsstrom an die Oberfläche, wo diese an der Pumpleitung elektronisch abgegriffen werden. Die Online-Auswertung stellt die Bohrspurtrajektorie in grafischer Form dar. Vielfach werden diese Geräte durch LWD-Systeme (Logging While Drilling) ergänzt, die z.B. über Messungen des elektrischen Widerstands und die Erfassung der natürlichen Gammastrahlung gleichzeitig und online Informationen über die Porosität und die Dichte der gerade durchbohrten Gebirgsschichten liefern.

04 Moderne, weitgehend automatisierte und schallgedämpfte Rotary-Tiefbohranlage



05

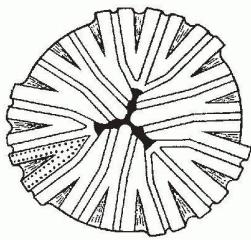
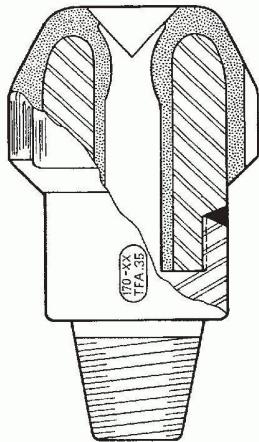


06

05 Neuer Dreirollen-Warzenmeissel

06 Neuer PDC-Meissel (Polycrystalline Diamond Compact), Bohrdurchmesser 30 cm

SONDERFALL GEOTHERMIEBOHRUNGEN



07 Schnitt und Ansicht eines PDC-Meissels
(Bilder: Roland Wyss)

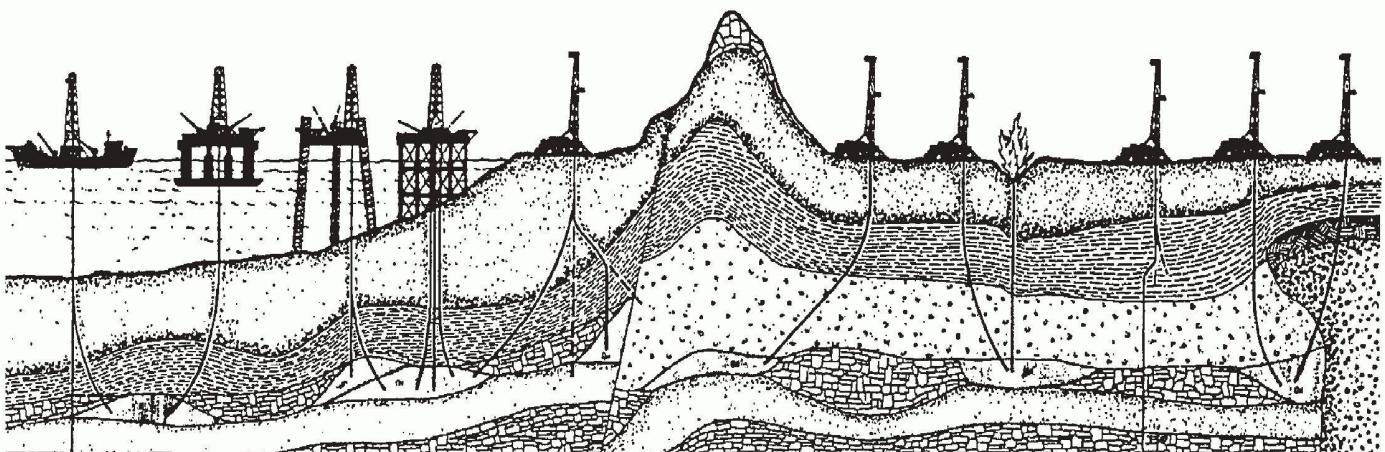
In der Planung von tiefen Geothermiebohrprojekten (Teufen von 3000–5000 m) mit nach dem Prinzip der Hot-Fractured-Rock-Technologie herzustellenden untertägigen Wärmetauschersystemen sind besondere Rahmenbedingungen und technische Erschwernisse zu berücksichtigen:

- Geothermiebohrungen erfordern aufgrund des hohen notwendigen Volumenstromes des Fördermediums einen grösseren Bohrungsdurchmesser als Fördersonden für Erdöl / Erdgas. Das bedeutet, dass entsprechend leistungsfähigere Bohranlagen eingesetzt werden müssen und die Erstellungs- und Ausbaukosten der Bohrungen demgemäß erhöht werden. So sind für Geothermiebohrungen in einer Tiefenstufe von ca. 5000 m Bohranlagen mit einer Haken- bzw. Zuglast von 400–600 t und einer installierten Gesamtantriebsleistung von ca. 10 000 PS erforderlich.

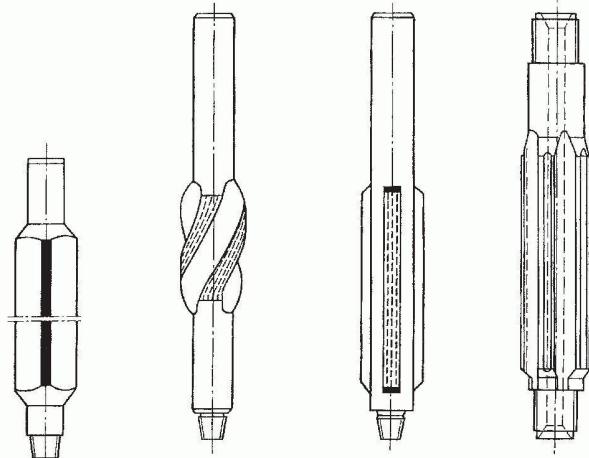
- Die Erschliessung hydrothermal nutzbarer Gesteinsformationen für die industrielle Nutzung der Wärmeenergie (z. B. in Form von Fernwärme) bedingt für einen wirtschaftlichen Betrieb die unmittelbare Nähe von Endabnehmern. Dies bedeutet, dass das geothermische Reservoir in einem gut entwickelten urbanen Gebiet oder in unmittelbarer Nähe davon aufgeschlossen werden muss. Die Erstellung z.B. eines Dublettensystems in ca. 3500 m Tiefe erfordert jedoch eine Bohrtätigkeit von ca. 8 Monaten, begleitet von den entsprechenden Emissionen von Lärm, Abgasen, Eschütterungen etc., wie sie eine Baustelle im 24-Stunden-Betrieb mit einer permanent installierten Maschinenarbeitsleistung von ca. 7000–8000 PS normalerweise abgibt.

In jüngster Zeit hat die Tiefbohrindustrie, welche die Marktchancen in der geothermischen Branche trotz der derzeitigen profitablen Entwicklung im Kohlenwasserstoffsegment durchaus mit Interesse verfolgt, auf diese Herausforderung reagiert. Besonders Nischenanbieter (aus der HDD, Horizontal-Directional-Drilling-Technologie) und Newcomer der Branche (aus dem Tunnelbau) drängen mit neu konzipierten Bohranlagentypen auf den Markt. Ob die damit angebotenen Bohranlagenkonzepte, die unbestritten eine richtungsweisende Entwicklung zu Kompaktbauweise, Arbeitssicherheit und elektronischer Automatisierung darstellen, den versprochenen Durchbruch auch in der technisch-wirtschaftlichen Umsetzung erfahren werden, ist zurzeit noch offen.

Geothermiebohrungen erschliessen vorzugsweise Gebirgshorizonte mit Temperaturen, die aufgrund geologischer Anomalien über dem natürlichen geothermischen Gradienten der Erdkruste liegen, der normalerweise $3^{\circ}/100 \text{ m}$ Tiefe beträgt. Somit sind die Bohrungskonzeptionen, die Abläufe der Bohrungserstellung, die Werkzeuge und die Bohrungsausbauten (z. B. Futterrohre) auf wesentlich höhere Arbeitstemperaturen auszulegen als bei herkömmlichen Tiefbohrungen. Daher

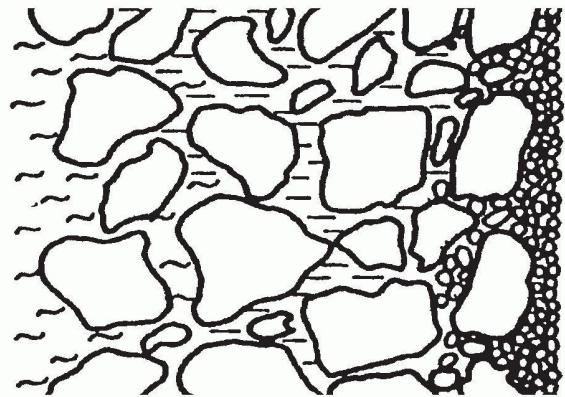


08 Anwendungen der Richtbohrtechnik



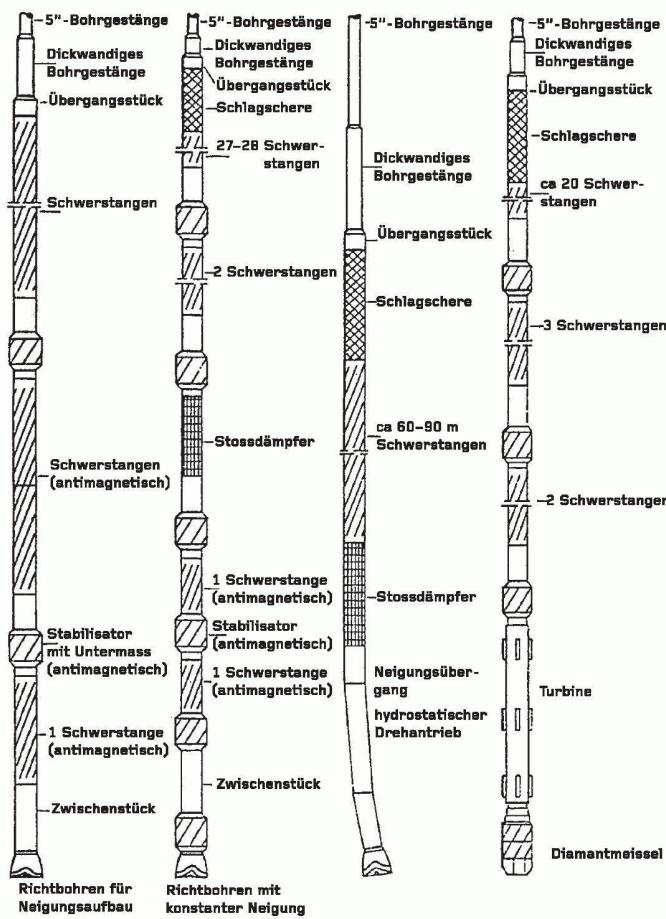
09

09 Verschiedene Bauarten von Stabilisatoren, die ins Bohrgestänge eingebaut werden

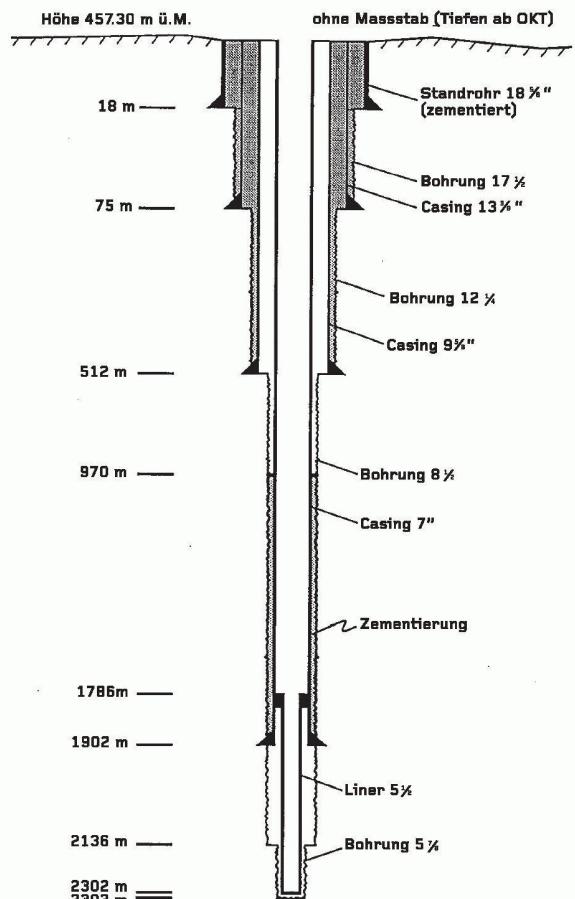


10

10 Ausbildung eines dichtenden Filterkuchens an der porösen Bohrlochwand bei Zugabe von Bentoniten zur Spülung



11 Verschiedene Bauarten von Richtbohrgarnituren



12 Verrohrungsschema einer Tiefbohrung

BOHRREKORDE DER TIEFBOHRTECHNIK

Aufgrund der Komplexität der modernen Bohrtechnik genügt die Bohrlochlänge allein nicht mehr als Massstab für einen Rekord. Es sind zwei Aspekte zu betrachten:

1. Die wahre Teufe (TVD, True Vertical Depth) bezeichnet die tatsächliche Tiefe einer Bohrung unter Annahme eines ideal vertikalen Bohrlöches

- KTB-Bohrung, Deutschland: 9142 m TVD (wissenschaftliche Bohrung zur Untersuchung der Erdkruste)
- Kola SG-3, Russland: 12 262 m TVD (wissenschaftliche Bohrung zur Untersuchung der Erdkruste)
Beide Bohrungen konnten nicht mehr vertieft werden, weil die extremen Erdtemperaturen in diesen Tiefen den Einsatz des Bohrwerkzeuges verunmöglichen.
- Bertha Rogers (Oklahoma, USA): 9586 m TVD (die tiefste jemals auf Öl- und Gaslagerstätten abgeteuft Bohrung)

2. Die Länge einer Bohrung (MD, Measured Depth) beschreibt die tatsächliche Abmessung der Bohrung

Richt- und Horizontalbohrungen können von der Teufe her relativ seicht, von der Länge her jedoch enorm sein. Das Verhältnis von horizontaler Gesamtabweichung (Abstand vom Oberflächenpunkt zur Sohle der Bohrung) und wahrer Teufe (TVD) wird «Aspect Ratio» genannt und stellt ein Maß für die Komplexität einer solchen Bohrung dar. Aspect Ratios von über 5:1 sind gegenwärtig nicht mehr ungewöhnlich. Dies bedeutet, dass eine Lagerstätte, die ca. 2000 m unter der Oberfläche liegt, in einer Entfernung von über 10 km vom Oberflächenpunkt erschlossen werden kann. Damit erreicht man Bohrlochlängen (MD) von über 12 000 m.

Solche Bohrungen sind durch die Kapazität der Bohranlage limitiert, die nur eine bestimmte Länge von Bohrgestänge in den Mast stellen kann. Das Hinauslegen von Bohrgestänge ist zeitaufwändig und gefährlich.

Einige Rekorde

- Total, Feuerland: MD 11 184 m, TVD 1666 m, horizontale Abweichung 10 585 m, Aspect Ratio $10\,585/1\,666 = 6.3 : 1$
- BP, Wytch Farm, UK: MD 11 280 m, TVD 1900 m, horizontale Abweichung 10 670 m, Aspect Ratio 5.6:1
- Chevron Texaco, Nordsee: 4606 m, längste Horizontalstrecke (im Captain-Feld)

müssen neben speziellen Stahl- und Zementsorten für die Bohrungsausbauten auch temperaturstabile Spülungsflüssigkeiten, hochtemperaturbeständige Bohr- und Logginggeräte und zusätzliche Kühlungseinrichtungen für die Bohrspülung verwendet werden.

Weiter gilt es, extreme Temperaturschwankungen, die sich durch das Einpumpen von Tausenden von Kubikmetern kalten Wassers zum Aufbrechen der Gesteinsschichten und zur Erzeugung einer untertägigen Wärmetauscherfläche ergeben, materialtechnologisch innerhalb des Bohrungsausbau zu beherrschen. Bei diesen Stimulationsmassnahmen wirken kurz- und mittelfristig Temperaturunterschiede von ca. 160 °C und mehr auf die kilometerlangen Stahl- und Zementausbauten einer Bohrung ein. In Anbetracht der enormen dadurch erzeugten axialen Spannungen und der gleichzeitig auftretenden Arbeitsdrücke von 300 bis 500 bar, die auf die Systeme einwirken, wird die Tragweite der ingenieur- und materialtechnologischen Problemstellungen unter der Erdoberfläche deutlich.

Aldo Rota, rota@tec21.ch

Andreas Macék, GeoWell GmbH, Untersiggenthal, geowell@bluemail.ch

Roland Wyss, Schweizerische Vereinigung für Geothermie SVG, Frauenfeld, wyss@rwgeo.ch