

Ansätze zur Ermittlung und Reduktion nichtproduktiver Zeiten an Tiefbohranlagen

Approaches for determination and reduction of non-productive times of drilling rigs for deep wells

Florian Bär¹
Catalin Teodoriu²
Ludger Overmeyer¹

¹ Institut für Transport- und Automatisierungstechnik,
Leibniz Universität Hannover

² Institut für Erdöl- und Erdgastechnik,
Technische Universität Clausthal

Aufgrund der hohen Kosten für Tiefbohrungen ist eine wirtschaftliche Stromerzeugung aus der tiefen Geothermie derzeit nur bedingt möglich. Da die Herstellkosten einer Tiefbohrung direkt von der Herstellzeit abhängig sind, wird eine Optimierung der nichtproduktiven Prozesse angestrebt. Vorrangig sind die Prozesse zu betrachten und zu optimieren, durch die eine Unterbrechung des Bohrens auftritt. Dies ist hauptsächlich beim Transport der Rohre zwischen Lager und Arbeitsplattform sowie bei den Verschraubungsprozessen der Rohre der Fall. Im Rahmen dieses Beitrags werden Konzepte zur Umgestaltung dieser Prozesse und Bewegungsabläufe an Tiefbohranlagen entwickelt und auf ihr zeitliches Einsparpotential untersucht.

[Schlüsselwörter: Tiefe Geothermie, Tiefbohranlage, nichtproduktive Prozesse, zeitliches Einsparpotential]

Because of the high drilling costs an economic power production of deep geothermal energy is currently elusive. Since the production costs of deep wells depend directly on the production time, the non-productive processes require an intensive optimization. Primarily, processes which lead to an interruption of the drilling process will be analyzed and optimized. These processes are mainly the transport of the pipes between rack and working platform as well as the connection process of the pipes. In context of this paper, approaches to redesign the processes and motion sequences for a deep drilling rig are developed and their time savings are investigated.

[Keywords: deep geothermal energy, drilling rig, non-productive processes, time saving]

1 EINLEITUNG

Die mittelfristige Verknappung der fossilen Energie-reserven erfordert den Ausbau neuer, nachhaltiger Energiequellen und der entsprechenden Technologien. Eine regenerative Energieform mit großem Potential ist die tiefe Geothermie. Hierbei wird die in der Erdkruste gespeicherte Wärme zur Stromerzeugung genutzt. Im Gegensatz zur Wind- und Solarenergie ist die Erdwärme unabhängig von der Tageszeit, den Witterungsbedingungen und saisonalen Schwankungen verfügbar. Um diese Form der Energie in Norddeutschland nutzen zu können, sind Tiefbohrungen mit Teufen von etwa 6000 m notwendig. Mit konventionellen Methoden ist die Herstellung dieser Bohrungen jedoch derart kostenintensiv, dass eine wirtschaftliche Stromerzeugung nur schwer zu erreichen ist. Ein Ziel des Forschungsverbundes Geothermie und Hochleistungsbohrtechnik (kurz: gebo) ist es daher, Ansätze wie die Herstellung einer monoborenen Bohrlochkonstruktion zu entwickeln und zu verfolgen. Es soll aufgezeigt werden, dass durch die Umsetzung dieser Ansätze eine signifikante Reduktion der Bohrkosten, speziell bei Geothermieprojekten, erreichbar ist. [ROO10]

Dazu sind zunächst die Prozesse und Arbeitsabläufe an Tiefbohranlagen zu analysieren und in produktive und nichtproduktive Prozesse zu unterteilen. Auf diese Weise werden die nichtproduktiven Prozesse und Abläufe erkannt, die eine Unterbrechung des produktiven Prozesses erfordern. Auf Basis dieser Untersuchungen können gezielt Konzepte zur Umgestaltung von Prozessen und Bewegungsabläufen an Tiefbohranlagen sowie Anlagenkomponenten entwickelt werden, die zu einer Reduzierung von Anzahl und Dauer dieser Unterbrechungen führen. Um das zeitliche Einsparpotential dieser Ansätze zu ermitteln, wird ein eigens für diesen Fall entwickeltes

Berechnungsmodell zur Modellierung des zeitlichen Ablaufs von Tiefbohrungen verwendet.

2 PROZESSANALYSE AN TIEFBOHRANLAGEN

Eine erfolgreiche Optimierung von Prozessen, Materialflüssen und Arbeitsabläufen erfordert zunächst eine explizite Kenntnis des Ist-Zustands, vgl. [AF09]. Zur Reduzierung der Herstellzeit einer Tiefbohrung sind daher sämtliche Prozesse an Tiefbohranlagen, die direkt mit dem Bohrprozess in Verbindung stehen, eingehend zu untersuchen. Diese Prozesse und Abläufe sind hinlänglich bekannt und werden in der einschlägigen Fachliteratur detailliert beschrieben, vgl. [Rei09], [Buj11] und [Ada85]. Die Aufnahme des Ist-Zustands erfolgt für die Prozesse der Tiefbohranlagen in Form von Flussdiagrammen. Abbildung 1 zeigt den Zusammenhang der Hauptprozesse (weiß hinterlegte Felder) zum Abteufen einer Tiefbohrung in Form eines Flussdiagramms.

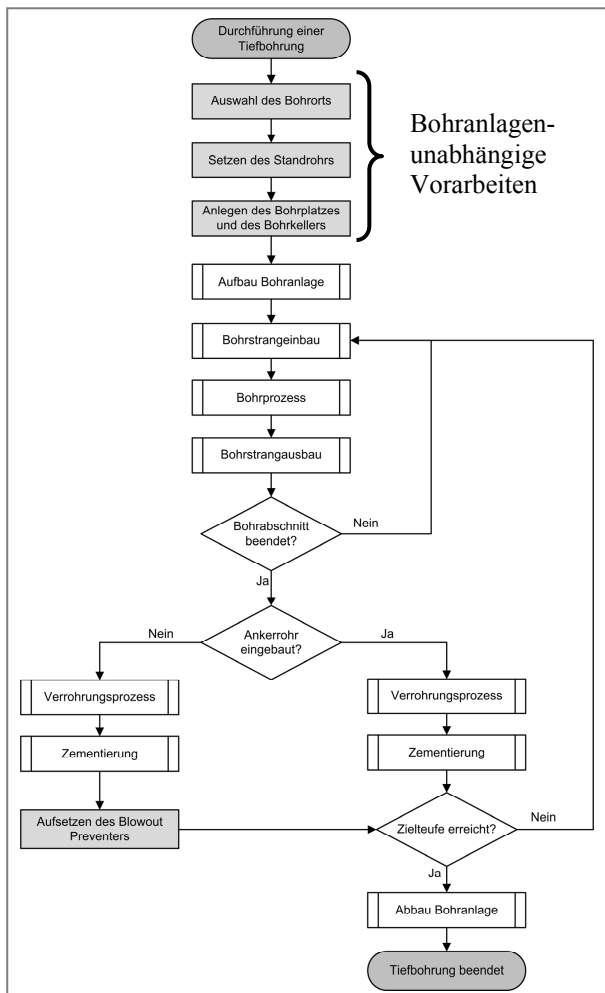


Abbildung 1. Flussdiagramm der Hauptprozesse zur Herstellung einer Tiefbohrung

Die Herstellung einer Tiefbohrung besteht neben den Vorarbeiten am Bohrplatz und dem Auf- und Abbau der

Tiefbohranlage aus fünf weiteren Hauptprozessen, die sich wiederholen bis die Zielteufe erreicht ist. Von zentraler Bedeutung ist hierbei der Bohrprozess. Der Bohrfortschritt, auch Rate of Penetration (ROP) genannt, wird mit Hilfe eines Meißels erzeugt, der an einem Bohrstrang hängt und durch das Bohrstranggewicht auf die Bohrlochsohle gepresst wird. Der Bohrstrang wird dazu aus neun Meter langen Rohren aufgebaut, die miteinander verschraubt werden. Um die gewünschte Zielteufe zu erreichen, müssen analog zum Bohrfortschritt sukzessive weitere Rohre zur Arbeitsplattform gebracht und an den Bohrstrang nachgesetzt werden. Ist der Meißel verschliffen oder das Ende eines Bohrabschnitts erreicht, wird der gesamte Bohrstrang rohrweise aus dem Bohrloch gezogen und sämtliche Schraubverbindungen gelöst. Die Rohre werden an der Bohranlage gelagert und nach dem Meißelwechsel oder dem Verrohren zum Sichern des Bohrlochs wieder eingebaut. Dieser gesamte Ablauf wird als Roundtrip bezeichnet. Das Verrohren des Bohrlochs erfolgt mit Hilfe spezieller Rohre, den Futterrohren, die ebenfalls zur Arbeitsplattform transportiert, dort verschraubt und in das Bohrloch eingefahren werden. Um das Bohrloch sicher gegen die Formation abzudichten, werden die zu einer Rohrtour verschraubten Futterrohre im Bohrloch einzementiert. Diese Hauptprozesse werden wiederholt, bis die gewünschte Endteufe der Tiefbohrung erreicht ist. Anschließend wird die Tiefbohranlage abgebaut und die Bohrung ist beendet.

Zur Berechnung der Zeit zur Herstellung einer Tiefbohrung dient die folgende Summengleichung, die aus dem Aufbau des in Abbildung 1 dargestellten Flussdiagramms abgeleitet werden kann:

$$\begin{aligned}
 t_{\text{Bohrung}} &= t_{\text{Vorarbeiten}} + t_{\text{Aufbau}} + t_{\text{Abbau}} \\
 &+ \sum_{i=1}^n (t_{\text{BSEinbau},i} + t_{\text{Bohrprozess},i} \\
 &+ t_{\text{BSAusbau},i}) \\
 &+ \sum_{i=1}^m (t_{\text{Verrohrung},i} + t_{\text{Zement},i})
 \end{aligned} \quad (1)$$

Die Hauptprozesse Bohrprozess, Bohrstrangeinbau (BSEinbau) und Bohrstrangausbau (BSAusbau) sind dabei n-mal durchzuführen, wobei die Variable n die Anzahl der benötigten Roundtrips darstellt. Nach jedem Bohrabschnitt erfolgt zudem die Verrohrung und Zementierung zur Sicherung der Bohrung. Diese Prozesse sind m-mal erforderlich, wobei m der Anzahl der Bohrabschnitte entspricht.

Um die Herstellung einer Tiefbohrung im Detail nachvollziehen zu können, werden sämtliche Hauptprozesse in ihre elementaren Arbeitsschritte zerlegt. Durch diese Zerlegung konnten Analogien zwischen den Hauptprozessen identifiziert werden. Bis auf den Prozess Ze-

mentierung, der von dem zu zementierenden Volumen, der Pumpleistung und einer Wartezeit zur Aushärtung des Zements besteht, setzen sich sämtliche Hauptprozesse aus ähnlichen Arbeitsabläufen zusammen. Die Gleichungen (2), (3) und (4) zeigen die Zerlegung dieser Prozesse in ihre einzelnen Arbeitsschritte:

$$t_{\text{Bohrprozess}} = t_{\text{Bohren}} + t_{\text{Spülen}} + t_{\text{Nachsetzen}} \quad (2)$$

$$t_{\text{BSEinbau}} = t_{\text{Verrohrung}} = t_{\text{TDrunterVoll}} + t_{\text{Nachsetzen}} \quad (3)$$

$$t_{\text{BSAusbau}} = t_{\text{TDhochVoll}} + t_{\text{Demontage}} \quad (4)$$

Wie der Aufbau der Gleichungen (2), (3) und (4) erkennen lässt, bestehen diese Hauptprozesse aus einer Bewegung der im Mast aufgehängten Antriebseinheit (Top Drive (TD)) und einem Prozess zum Herstellen (Nachsetzen) bzw. Lösen (Demontage) einer Rohrverbindung.

Im Bohrprozess ist diese Bewegung des Top Drives eine Abwärtsbewegung, deren Geschwindigkeit durch die ROP bestimmt wird. Eine Abwärtsbewegung findet zudem auch beim Einbau des Bohrstrangs sowie dem Verrohrungsprozess statt. Im Gegensatz zum Bohrprozess, ist diese Bewegung lediglich vom Fahrtrieb des Top Drive und der zu bewegendenden Masse des Bohrstrangs bzw. der Futterrohre abhängig. Die Zeiten dieser Top Drive Bewegungen werden in dem Fall anhand der Antriebsleistung und der geometrischen Daten der Bohranlage ermittelt. Die gleiche Vorgehensweise zur Berechnung der Bewegungsdauer wird auch beim Ausbau des Bohrstrangs angewandt. Jedoch ist für diesen Prozess eine Aufwärtsbewegung zu berücksichtigen.

Beim Bohrstrangeinbau, dem Verrohrungsprozess und dem Bohrprozess ist der Bohrstrang bzw. die Futterrohrtour zu verlängern. Der Transport der Rohre zur Arbeitsplattform sowie der Verbindungsprozess wird durch den Prozess Nachsetzen berücksichtigt, vgl. Gleichung (5). Im Prozess Bohrstrangausbau wird der Bohrstrang rohweise aus dem Bohrloch herausgezogen. Anschließend wird das Rohr durch einen Demontageprozess vom Bohrstrang gelöst und in ein Magazin oder Lager eingelagert, vgl. Gleichungen (6).

$$\begin{aligned} t_{\text{Nachsetzen}} &= t_{\text{Fixierung}_{\text{zu}}} + t_{\text{Handling} \rightarrow \text{BL}} \\ &+ t_{\text{TDhochLeer}} \\ &+ t_{\text{Verschraubung}} + t_{\text{Fixierung}_{\text{auf}}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} t_{\text{Demontage}} &= t_{\text{Fixierung}_{\text{zu}}} + t_{\text{Entschraubung}} \\ &+ t_{\text{Handling} \rightarrow \text{Lager}} + t_{\text{TDrunterLeer}} \\ &+ t_{\text{BSGreifen}} + t_{\text{Fixierung}_{\text{auf}}} \end{aligned} \quad (6)$$

Wie diese Gleichungen zeigen, sind die Prozesse Nachsetzen und Demontage maßgeblich von der Handhabung der Rohre an der Tiefbohranlage, von den Fahrbewegungen des Top Drive Antriebs im Mast sowie den Prozessen zur Verschraubung und zum Lösen der Rohrverbindungen abhängig.

Aus logistischer Sicht ist hierbei vor allem die Handhabung der Rohre interessant. Der Transport der Rohre zur Arbeitsplattform aus dem Prozess Nachsetzen sowie zum Magazin beim Demontageprozess sind in den Gleichungen (7) und (8) dargestellt.

$$\begin{aligned} t_{\text{Handling} \rightarrow \text{BL}} &= t_{\text{Auslagern}} + t_{\text{Bew} \rightarrow \text{AP}} + t_{\text{ÜbergabeTD}} \\ &+ t_{\text{Bew} \rightarrow \text{Lager}} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} t_{\text{Handling} \rightarrow \text{Lager}} &= t_{\text{Bew} \rightarrow \text{AP}} + t_{\text{Übergabe} \rightarrow \text{PH}} + t_{\text{Bew} \rightarrow \text{Lager}} \\ &+ t_{\text{Einlagern}} \end{aligned} \quad (8)$$

Diese beiden Prozesse werden von den Fahrbewegungen zwischen einer Übergabeposition an der Arbeitsplattform und einer Lagerposition am Magazin bestimmt (Bew → AP und Bew → Lager). Zudem sind die Zeiten für das Aus- bzw. Einlagern der Rohre in das Magazin sowie die Übergabe der Rohre zwischen Top Drive und Handhabungssystem (ÜbergabeTD und ÜbergabePH) zu berücksichtigen.

Prozessbedingt und zur Vermeidung von Kollisionen zwischen den unterschiedlichen Komponenten an Tiefbohranlagen, laufen die einzelnen Arbeitsschritte grundsätzlich sequentiell ab. Wie die Gleichungen (1) bis (8) zeigen, besteht somit ein direkter Zusammenhang zwischen der Gesamtzeit zur Herstellung einer Tiefbohrung und der zeitlichen Dauer der Handhabung der Rohre an den Bohranlagen. Um diesen und weitere Einflussfaktoren explizit untersuchen zu können, ist ein Berechnungsmodell auf Basis dieser Prozessanalyse aufgebaut worden.

3 BERECHNUNGSMODELL FÜR TIEFBOHRANLAGEN

Die Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Herstellungszeit einer Tiefbohrung ist für die Entwicklung von Optimierungsansätzen obligatorisch. Dies ist jedoch nur anhand von Studien an einem Modell möglich, da hier eine schnelle Variation der Parameter und Randbedingungen erfolgen kann. Entscheidend für die Genauigkeit und

Richtigkeit der Ergebnisse ist bei diesem Vorgehen die Übereinstimmung des Modells mit der Realität.

Zur Entwicklung eines geeigneten Berechnungsmodells werden die Gleichungen aus der Prozessanalyse verwendet und in einer Programmierumgebung umgesetzt. Der Aufbau und die Funktionsweise dieses Berechnungsmodells sind in Abbildung 2 dargestellt.

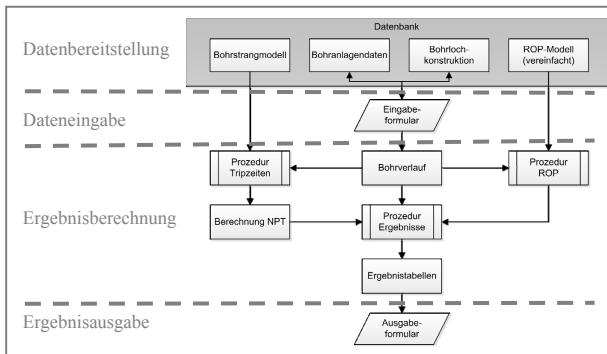


Abbildung 2. Aufbau und Funktionsweise des Berechnungsmodells

Die zur Berechnung erforderlichen Eingangsparameter sind Aufzeichnungen von Feldstudien der TU Clausthal an Tiefbohranlagen und der Fachliteratur, wie [RBY10], entnommen. Diese Eingangsdaten werden in einer Datenbank hinterlegt und dem Modell zur Verfügung gestellt. Die Datenbank beinhaltet Daten zu unterschiedlichen Tiefbohranlagen, speziell deren Handhabungs- und Verbindungssystemen, Aufbau von Bohrlochkonstruktionen, den Aufbau eines Bohrstangmodells sowie ein vereinfachtes ROP-Modell mit dem der Bohrfortschritt in Abhängigkeit der Teufe und des Bohrlochdurchmessers berechnet wird. Über die Eingabeformulare können die Bohranlagendaten und die Bohrlochkonstruktionen aus der Datenbank aufgerufen und bearbeitet werden, vgl. Abbildung 3.

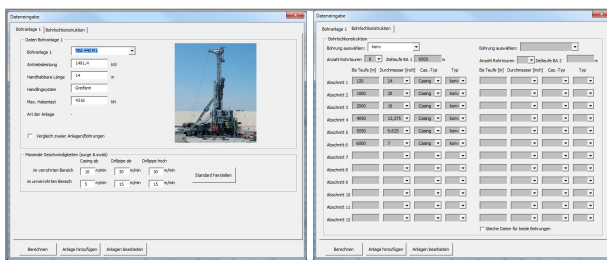


Abbildung 3. Eingabeformulare

Wird nun ein Berechnungsdurchlauf aus dem Eingabeformular gestartet, greift das Programm zunächst auf die gewählte Bohrlochkonstruktion aus der Datenbank zu und erstellt daraus den generellen Bohrverlauf. Anhand dieses Bohrverlaufs werden die entsprechenden nichtproduktiven Zeiten und die Bohrzeiten der entsprechenden Bohrabschnitte berechnet. Dies geschieht über die jeweiligen Prozeduren *Tripzeiten* und *ROP*. Die Berechnungs-

ergebnisse der jeweiligen Bohrabschnitte werden an die Prozedur *Ergebnisse* übergeben, dort zusammengefasst und in vorformatierte Ergebnistabellen eingetragen. Zur besseren Übersicht und einer schnellen Auswertung werden die Ergebnisse grafisch aufbereitet und in Ausgabeformularen dargestellt, vgl. Abbildung 4.

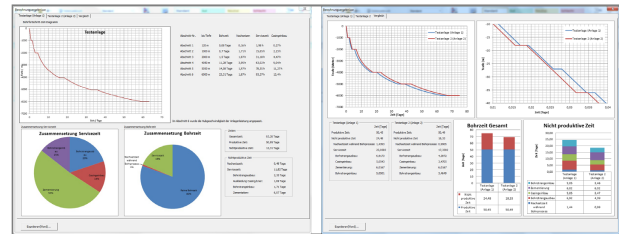


Abbildung 4. Ausgabeformulare

Das Ergebnis der Berechnung mit diesem Modell ist zunächst die Abbildung des zeitlichen Verlaufs der Herstellung einer definierten Bohrlochkonstruktion mit einer definierten Tiefbohranlage. Wird dieser zeitliche Verlauf über die Teufe aufgetragen, erhält man das charakteristische Zeit-Teufe-Verhalten für die jeweilige Kombination aus Tiefbohranlage und Bohrlochkonstruktion. In Abbildung 5 ist ein exemplarisches Zeit-Teufe-Diagramm dargestellt.

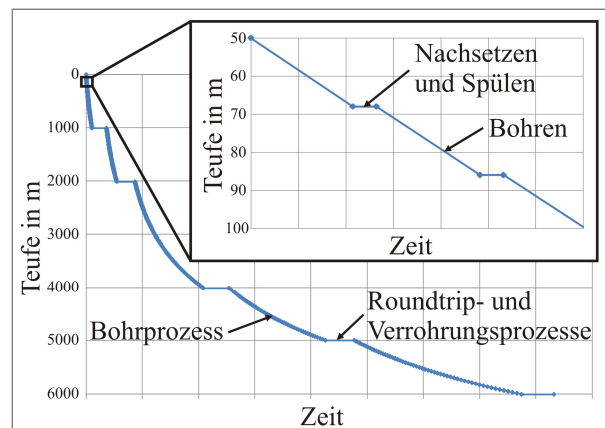


Abbildung 5. Zeit-Teufe-Diagramm einer Tiefbohrung

Wie die Abbildung 5 zeigt, lässt sich das Abteufen einer Bohrung in zwei sich wiederholende Abschnitte unterteilen. In dem einen Abschnitt, dem Bohrprozess, wird der Bohrfortschritt erzeugt und das Bohrgestänge rohweise nachgesetzt. Die Roundtrip- und Verrohrungsprozesse beinhalten den Bohrstangein- und -ausbau sowie die Verrohrung und die Zementierung. Es ist in Abbildung 5 erkennbar, dass sowohl der Prozess Nachsetzen als auch sämtliche Roundtrip- und Verrohrungsprozesse zu Unterbrechungen des Bohrens und damit der produktiven Zeit führen. Diese nichtproduktiven Zeiten werden explizit für sämtliche Bohrabschnitte in den Ausgabeformularen aufgeführt. Die Darstellung erfolgt dabei in tabellarischer Form sowie im Rahmen von Balken- und Tortendiagrammen. Diese Form der Darstellung ermög-

licht zum einen eine schnelle Identifikation der größten Einflussfaktoren für die Unterbrechungen des Bohrens und zum anderen eine gute Vergleichbarkeit mit anderen Kombinationen aus Tiefbohranlage und Bohrlochkonstruktion.

4 REDUZIERUNG NICHTPRODUKTIVER PROZESSZEITEN

Die Prozessanalyse hat gezeigt, dass die meisten Hauptprozesse an Tiefbohranlagen von der Handhabung der Rohre abhängig sind. Eine Optimierung in diesem Bereich kann daher zu einer signifikanten Reduzierung der nichtproduktiven Zeiten einer Tiefbohranlage führen. Um die Gültigkeit dieser These zu überprüfen, wird der Einfluss unterschiedlicher Handhabungssysteme bei der Herstellung einer Tiefbohrung untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen Ansätze für die Optimierung der nichtproduktiven Prozesse liefern.

4.1 EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE NICHTPRODUKTIVEN PROZESSZEITEN

Zur Realisierung des Ziels Stromerzeugung aus geothermischer Energie sind einige Randbedingungen zu beachten. Wesentliche Punkte für eine wirtschaftliche Stromerzeugung sind die Wärme im unterirdischen Wärmetauscher und die erreichbare Durchflussmenge, die in der abgeteuften Bohrung erreichbar ist. Hierfür spielt die Bohrlochkonstruktion eine entscheidende Rolle. Aufgrund der Gegebenheiten im Norddeutschen Becken ist eine Zielteufe von 6000 m und ein Mindestdurchmesser von 7“ (ca. 178 mm) für die Produktionsrohrtour erforderlich. Abbildung 6 zeigt mögliche Bohrlochkonstruktionen für eine derartige Bohrung.

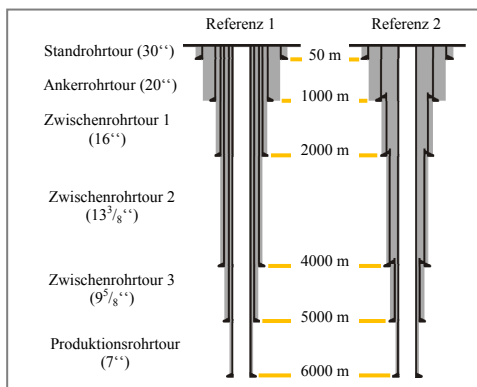


Abbildung 6. Konventionelle Bohrlochkonstruktionen. Links: Zwischenrohrtour mit Casings, rechts: Zwischenrohrtour mit Linern

Wie Abbildung 6 zeigt, erfährt eine Bohrung mit jedem Verrohrungsprozess eine Verringerung des Durchmessers. Diese Reduzierung ergibt sich aus der Wandstärke des Futterrohres und der Dicke der Zementschicht. Aus diesem Grund ist die Planung einer Bohrung in der Bohr-

technik stets von dem Zielhorizont bzw. der Zielteufe zur Oberfläche durchzuführen, vgl. [Buj10]. Die Anzahl der notwendigen Verrohrungsprozesse wird von den jeweiligen lokalen geologischen Gegebenheiten des zu durchbohrenden Untergrunds bestimmt. Für das Norddeutsche Becken sind daher zwei Referenzbohrungen entwickelt worden, die jeweils aus 6 Rohrtouren bestehen. Die Standrohrtour mit einem Durchmesser von 30“ endet bei 50 m. Die Ankerrohrtour hat einen Durchmesser von 20“ und erreicht ihre Zielteufe bei 1000 m. Danach werden drei Zwischenrohr Touren gesetzt die Durchmesser von 16“, 13³/₈“ und 9⁵/₈“ aufweisen. Die Abschnitte für diese Rohrtouren enden bei 2000 m, 4000 m und 5000 m. Zuletzt wird dann eine Produktionsrohrtour mit einem Durchmesser von 7“ bis zur Endteufe von 6000 m eingesetzt. Der Unterschied zwischen den Bohrungen Referenz 1 und Referenz 2 liegt in der unterschiedlichen Ausführung der Zwischenrohr Touren. Diese Rohrtouren sind in der Referenzbohrung 1 als Casing, also als durchgehende Rohrtour von der Bohrlochsohle der Bohrabschnitte bis zur Oberfläche ausgeführt. In der Bohrung Referenz 2 werden diese Rohrtouren lediglich in der Länge des zu verrohrenden Abschnitts hergestellt und in der vorherigen Verrohrung eingehängt. Diese Rohrtouren werden als Liner bzw. verlorene Rohrtouren bezeichnet.

Neben dem Einfluss der Bohrlochkonstruktion sollen auch die Effekte auf die Prozesszeiten an Bohranlagen analysiert werden, die durch den Einsatz unterschiedlicher Handling-Einrichtungen und Bohrverfahren auftreten. Aus diesem Grund wurden zwei Rotary-Bohranlagentypen in die Datenbank des Benchmark-Modells implementiert, mit denen die grundlegenden Handling-Systeme für Rohre an Bohranlagen abgebildet werden können.

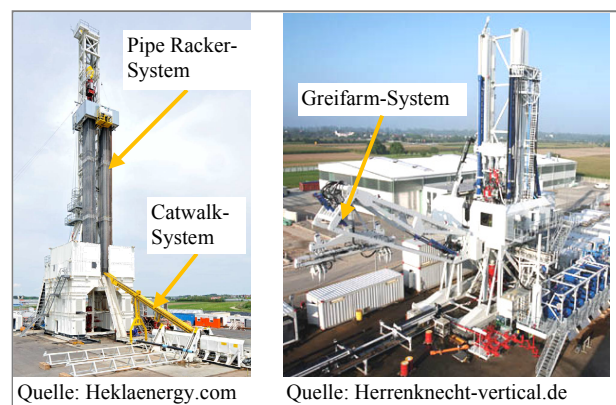


Abbildung 7. Konventionelle Rotary-Bohranlagen. Links: FB1, rechts: FB2.

Der erste Bohranlagentyp (FB1), der in das Modell implementiert wurde, ist in der Lage, die neun Meter langen Rohre einzeln über ein Catwalk-System zur Arbeitsplattform zu fördern. Wahlweise besteht hierbei die Möglichkeit, ein Pipe Racker-System zur Zwischenlagerung von Zügen aus drei verschraubten Rohren des Bohrgestänges auf der Bohrplattform zu verwenden. Die Bohr-

anlage FB2 verwendet ein Greifarm-System zur Handhabung von Zügen aus zwei Rohren für das Bohrgestänge. Das Greifarm-System kann zudem einzelne Futterrohre transportieren.

Mit Hilfe des vorgestellten Berechnungsmodells sind die zeitlichen Verläufe zur Herstellung der Referenzbohrungen 1 und 2 mit den oben vorgestellten Tiefbohranlagen simuliert worden. Hierzu wurde die Bohranlage FB1 zunächst ohne Einsatz des Pipe Racker-Systems und anschließend mit diesem System betrachtet. Um eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erreichen, wurde der Ablauf der Referenzbohrung 1 mit der Tiefbohranlage FB1 ohne Pipe Racker-System als Grundlage genommen und sämtliche Ergebnisse prozentual dazu in Relation gesetzt. Abbildung 8 zeigt die Berechnungsergebnisse der nichtproduktiven Zeiten für die entsprechenden Kombinationen aus Tiefbohranlage und Bohrlochkonstruktion.

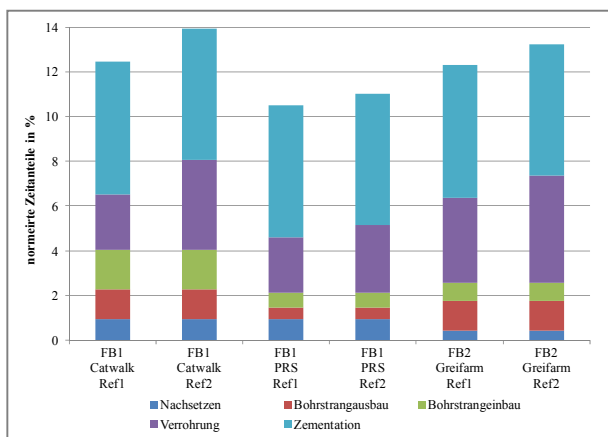


Abbildung 8. Berechnungsergebnisse der nichtproduktiven Zeiten für konventionelle Tiefbohranlagen und Bohrlochkonstruktionen

Die Ergebnisse dieser Berechnungen lassen erkennen, dass ein Einfluss der Bohrlochkonstruktion, bzw. des Verrohrungsschemas auf die nichtproduktiven Zeiten besteht. Wie der Vergleich der Balken 1 und 2 in der Abbildung 8 zeigt, verlangt die Herstellung der Bohrung Referenz 2 einen größeren Aufwand im Bereich des Verrohrungsprozesses als die Referenzbohrung 1. Dieser Zusatzaufwand lässt sich dadurch erklären, dass für die Verrohrung der Referenzbohrung 2 Liner verwendet werden. Zwar erfolgt die Herstellung der Rohrtour in einer geringeren Zeit als die Herstellung eines Casings, jedoch müssen die Liner nach der Montage in ihre Untertageposition gebracht werden. Diese Aufgabe wird von dem Bohrstrang übernommen. Das bedeutet, dass der Bohrstrang in das Bohrloch eingebaut und, nachdem der Liner die Untertageposition erreicht hat, wieder ausgebaut werden muss. Die Zeit, die dieser Vorgang in Anspruch nimmt, lässt sich nicht vollständig durch die schnellere Montage und die kürzere Zementierung des Liners kompensieren.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die nichtproduktive Zeit ist die Handhabung der Rohre an der Tiefbohranlage. Eine Änderung des verwendeten Handhabungssystems führt zu Veränderungen in den Prozessen Bohrstrangein- und -ausbau sowie dem Prozess Nachsetzen, vgl. Abbildung 8 Balken 1, 3 und 5. Betrachtet man die Topologie und verwendeten Handhabungssysteme der entsprechenden Tiefbohranlagen, wird anhand der Berechnungsergebnisse erkennbar, dass die Verlängerung der handhabbaren Rohre sowie die Verkürzung der Transportwege zu einer Reduzierung der nichtproduktiven Zeiten führt. Das bedeutet, dass die Transporte der Rohre zwischen Lager und Arbeitsplattform sowie die Prozesse zum Herstellen und Lösen der Verschraubung der Rohre diese Unterbrechungen maßgeblich beeinflussen. Aus diesem Grund sind die Ansätze zur Reduzierung der nichtproduktiven Zeiten einer Tiefbohranlage innerhalb der Handhabungs- und Verbindungsprozesse der Rohre zu suchen. Allerdings ist der prozentuale Anteil der nichtproduktiven Zeiten an konventionellen Tiefbohranlagen mit 10 % bis 15 % im Vergleich zur Gesamtzeit relativ gering. Eine signifikante Reduzierung der Herstellzeit kann nur realisiert werden, wenn die produktiven Zeiten ebenfalls verkürzt werden können.

4.2 MONOBORE BOHRLOCHKONSTRUKTION

Ein Ansatz zur Verkürzung des produktiven Prozesses der im Rahmen des gebo-Forschungsverbundes untersucht wird, ist die Herstellung einer monoboren Bohrlochkonstruktion, vgl. [TL13]. Eine monobore Bohrlochkonstruktion hat das Ziel, ein Bohrloch herzustellen, das von der Oberfläche bis zur Zielteufe einen konstanten Durchmesser aufweist. Durch diese Art der Bohrlochkonstruktion lassen sich die Durchmesser der Bohrung, vor allem im oberflächennahen Bereich, reduzieren. Da die Bohrgeschwindigkeit (ROP) vom Durchmesser abhängig ist, ist durch diesen Ansatz eine Verkürzung des Bohrprozesses möglich.

Um ein derartiges Bohrloch herzustellen, werden spezielle Futterrohre benötigt, die in das Bohrloch eingebracht und dort auf einen größeren Durchmesser expandiert werden können. Im gebo-Forschungsverbund wird daher die Entwicklung sogenannter Faltröhre fokussiert. Bei den Faltröhren handelt es sich zunächst um zylindrische Rohre, die mit Hilfe einer Matrize profiliert werden, bis ein Zustand erreicht ist, in dem das profilierte Rohr durch ein zylindrisches Rohr mit dem Ursprungsdurchmesser geführt werden kann [VBH11]. Diese profilierten Faltröhre werden zu einer Rohrtour von 500 m verbunden und wie ein Liner in die Bohrung abgelassen. An der Untertageposition wird die Rohrtour auf den ursprünglichen zylindrischen Durchmesser expandiert.

Abbildung 9 zeigt den Aufbau der monoboren Bohrlochkonstruktion, wie sie zur geothermischen Stromerzeugung im Norddeutschen Becken eingesetzt werden

kann. Zum Vergleich ist die monobore Bohrlochkonstruktion der Referenzbohrung 1 gegenübergestellt.

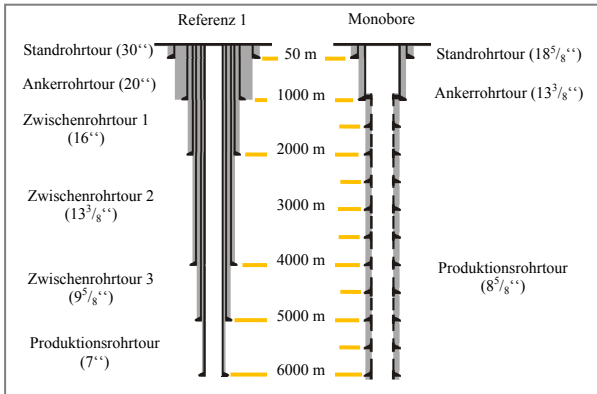


Abbildung 9. Monobore Bohrlochkonstruktion

Aufgrund der gesetzlichen Restriktionen in Deutschland sind die ersten beiden Rohrtouren sämtlicher Bohrlochkonstruktionen als Standardverrohrung auszuführen. Diese beiden Bohrabschnitte verlaufen daher analog zur Referenzbohrung 1, jedoch sind die Durchmesser mit $18\frac{5}{8}''$ und $13\frac{3}{8}''$ wesentlich geringer. Anschließend wird das Bohrloch in 500 m Schritten mit den expandierbaren Faltröhren, verrohrt. Der Durchmesser der expandierten Faltröhre beträgt $8\frac{5}{8}''$. Der Vergleich der Bohrlochkonstruktionen zeigt zudem, dass durch eine monobore Bohrlochkonstruktion der Durchmesser der Bohrung in den oberen Abschnitten verringert und gleichzeitig der Durchmesser der Produktionsrohrtour vergrößert werden kann. Die Ergebnisse der Berechnung der nichtproduktiven Zeiten der monoboren Bohrlochkonstruktion im Vergleich mit dem Verlauf der Referenzbohrung 1 für die Tiefbohranlage FB1 zeigt Abbildung 10.

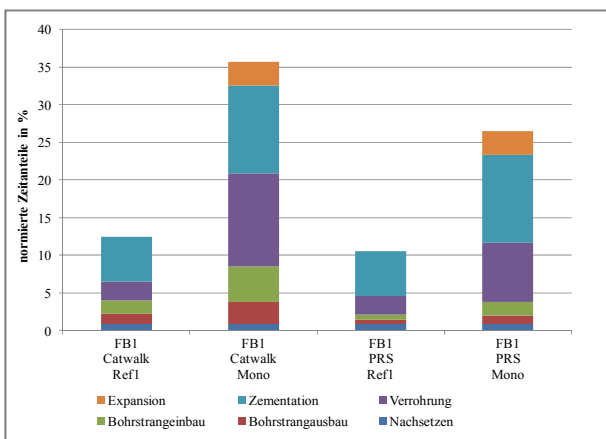


Abbildung 10. Berechnungsergebnisse der nichtproduktiven Zeiten für eine monobore Bohrlochkonstruktion

Bei der Betrachtung dieser Berechnungsergebnisse fällt auf, dass die monobore Bohrlochkonstruktion zu einer deutlichen Erhöhung der nichtproduktiven Zeiten führt. Besonders der Verrohrungsaufwand nimmt bei die-

ser Bohrlochkonstruktion zu. Der Grund dafür ist, dass die Verrohrung der monoboren Bohrlochkonstruktion mit Linern vorgenommen wird. Diese werden mit Hilfe des Bohrstrangs an die Untertageposition gebracht. Die Zeit für den Ein- und Ausbau des Bohrstrangs fließt in diesem Fall in den Verrohungsprozess ein. Zudem werden Liner aus Faltröhren für die Verrohrung verwendet. Die Zeit für die untertägige Expansion ist somit ebenfalls zu berücksichtigen. Ein weiterer Grund für die Erhöhung der nichtproduktiven Zeiten liegt in der hohen Anzahl der Verrohungsprozesse. Da die Bohrung in Schritten von 500 m Länge verrohrt wird, findet somit die doppelte Anzahl der Verrohungsprozesse im Vergleich zur Referenzbohrung 1 statt. Dadurch steigt auch die Häufigkeit mit der die zur Vorbereitung der Verrohrung notwendigen Prozesse, wie der Bohrstrangein- und -ausbau und die Zementierung, erfolgen müssen.

Bei relativ langsamer Handhabung der Rohre an Tiefbohranlagen, wie es bei der Anlage FB1 ohne Pipe Racker-System der Fall ist, erhöht sich der Anteil der nichtproduktiven Zeit an der Gesamtzeit von 12,5 % auf etwa 35 % durch die monobore Bohrlochkonstruktion. Eine Optimierung der Handhabung der Rohre durch den Einsatz des Pipe Racker-Systems führt zu einem geringeren Anstieg der normierten Zeitannteile der nichtproduktiven Prozesse. In diesem Fall steigt der Anteil der nichtproduktiven Zeit von 10 % auf etwa 26 %.

Da die monobore Bohrlochkonstruktion aufgrund der geringeren Bohrlöchdurchmesser jedoch zu einer Reduzierung der produktiven Zeit führt, ist für eine Bewertung dieses Ansatzes die Gesamtzeit zu betrachten und mit dem konventionellen Vorgehen zu vergleichen. Die Gesamtzeiten dieser Verfahren sind in Abbildung 11 aufgeführt.

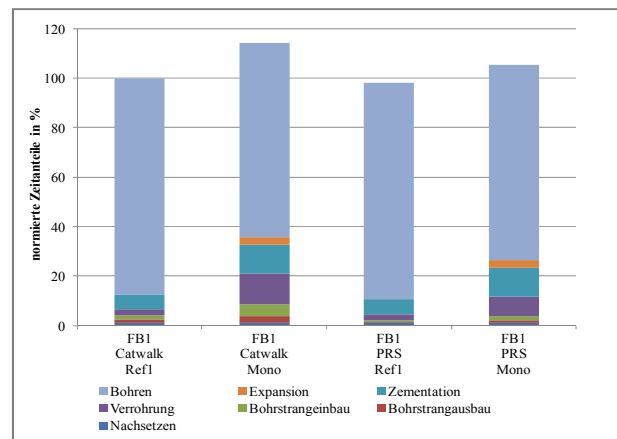


Abbildung 11. Berechnungsergebnisse der Gesamtzeiten für eine monobore Bohrlochkonstruktion

Durch die gesteigerte ROP, wird die Erhöhung der nichtproduktiven Zeiten bei monoboren Bohrlochkonstruktionen zu einem geringen Teil kompensiert. Die Gesamtzeit erhöht sich ohne den Einsatz des Pipe Racker-Systems um 16 %. Wird ein Pipe Racker-System einge-

setzt, beträgt die Erhöhung der Gesamtzeit lediglich 7 %. Damit jedoch Einsparungen durch diese Art der Bohrlochkonstruktion erreicht werden können, sind deutliche Reduzierungen der nichtproduktiven Zeiten und zusätzliche Verbesserungen des Bohrprozesses notwendig. Dies ist allerdings nur mit einem Wechsel des grundlegenden Bohrverfahrens möglich.

4.3 COILED TUBING-BOHRANLAGE

Eine Coiled Tubing-Bohranlage verwendet im Gegensatz zu den konventionellen Rotary-Bohranlagen keine einzelnen Rohre, die zu einem Bohrstrang verschraubt werden. Bei dieser Art der Bohranlagen wird ein Bohrstrang verwendet, der auf eine Trommel gewickelt ist. Je nach Durchmesser kann sich ein Bohrstrang mit bis zu mehreren hundert Metern Länge auf der Trommel befinden. Abbildung 12 zeigt den Aufbau einer Coiled Tubing-Bohranlage.

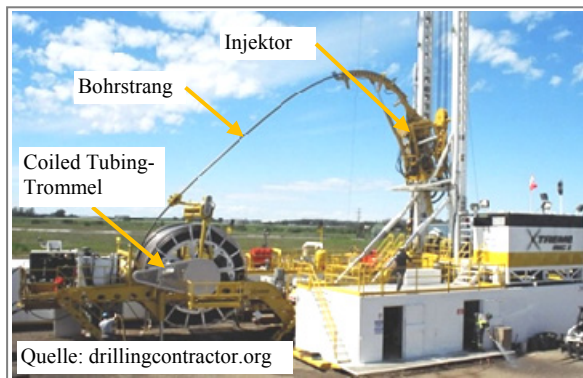


Abbildung 12. Coiled Tubing-Bohranlage

Der Bohrstrang wird hierbei analog zum Bohrschritt von der Trommel abgewickelt. Das Ein- und Ausfahren in das Bohrloch sowie die Begradigung übernimmt der Injektor. Da der Bohrstrang bei diesem Bohrverfahren nicht in Rotation versetzt werden kann, wird ein Untertagemotor eingesetzt um den Meißel anzutreiben. Allerdings können mit einer Coiled Tubing-Bohranlage bislang keine großen Teufen erreicht werden. Zum Bohren der großen Bohrlochdurchmesser, vor allem im oberen Bereich der Bohrung, wird ein hohes Drehmoment am Meißel benötigt. Die erforderlichen Bohrstrangdurchmesser, die zur Aufnahme dieses Drehmoments eingesetzt werden müssen, lassen sich jedoch nicht auf die verwendeten Trommeln aufwickeln. Da durch eine monobore Bohrlochkonstruktion die Bohrlochdurchmesser reduziert werden können, ermöglicht diese Art der Bohrlochkonstruktion die Herstellung von Tiefbohrungen mittels Coiled Tubing-Bohranlagen.

Der Vorteil des Coiled Tubing-Verfahrens liegt in dem langen, gewickelten Bohrstrang. Durch diesen langen Bohrstrang kann ein Großteil der Bohrstrangverbindungen eingespart werden. Dies führt wiederum zu einer Reduktion der nichtproduktiven Zeiten. Für die Berechnung der

Herstellung der monobore Bohrlochkonstruktion wird eine Coiled Tubing-Bohranlage betrachtet, die Trommeln mit einer Bohrstranglänge von 500 m verwendet. Für entsprechend längere Bohrabschnitte sind die Bohrstränge durch Konnektoren miteinander zu verbinden, so dass eine Bohrstranglänge von bis zu 6000 m entsteht. Nachteilig bei diesem Verfahren ist die kurze Lebensdauer des Bohrstrangs aufgrund der hohen Anzahl plastischer Verformungen während des Ein- und Ausbaus. Zudem kann der Bohrstrang nicht rotiert werden. Hierdurch können Probleme wie das Festsetzen des Bohrstrangs („differential sticking“) oder eine schlechte Zementanbindung auftreten. Ein Ansatz zur Vermeidung dieser Probleme werden in [Leh12] vorgestellt. Im gebo-Forschungsverbund werden ebenfalls Ansätze zur Optimierung der Handhabungs- und Verbindungsprozesse für gewickelte Rohre untersucht, um die Anzahl der plastischen Verformungen zu minimieren. Die Futterrohre werden an dieser Bohranlage in einzelnen Segmenten über ein Catwalk-System, analog zur Bohranlage FB1, zur Arbeitsplattform befördert. Abbildung 10 zeigt die Berechnungsergebnisse der nichtproduktiven Zeiten für die Herstellung einer monobore Bohrlochkonstruktion mit einer Coiled Tubing-Bohranlage, verglichen mit der Bohranlage FB1.

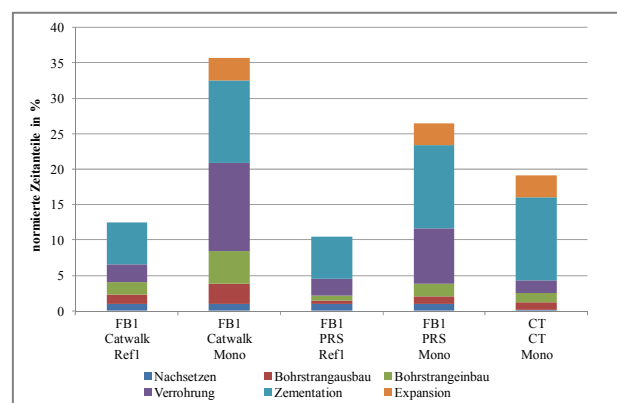


Abbildung 13. Berechnungsergebnisse der nichtproduktiven Zeiten für eine monobore Bohrlochkonstruktion mit einer Coiled Tubing-Bohranlage

Wie die Ergebnisse in Abbildung 13 zeigen, kann durch die Handhabung des Bohrstrangs beim Coiled Tubing-Verfahren die nichtproduktive Zeit reduziert werden. Da diese Anlage im Vergleich zur konventionellen Tiefbohranlage FB1 einen wesentlich längeren Bohrstrang verwendet, sind entsprechend weniger Verbindungen herzustellen und zu lösen. Dies zeigt sich in den deutlichen Reduzierungen der nichtproduktiven Prozesse Nachsetzen, Bohrstrangein- und -ausbau sowie der Verrohrung. Allerdings sind bei dieser Bohrlochkonstruktion weiterhin die Zeitanteile für die Zementation und für die Expansion vorhanden und entsprechend hoch, so dass immer noch ein Mehraufwand für die nichtproduktiven Zeiten im Vergleich zu einer konventionellen Anlage bei einer konventionellen Bohrung entsteht, vgl. Abbildung 13 Balken 5.

Werden jedoch die Gesamtzeiten betrachtet, ist eine Reduzierung der Gesamtzeit um 26 % im Vergleich zur Tiefbohranlage FB1 erkennbar, vgl. Abbildung 14, Balken 1, 3 und 5.

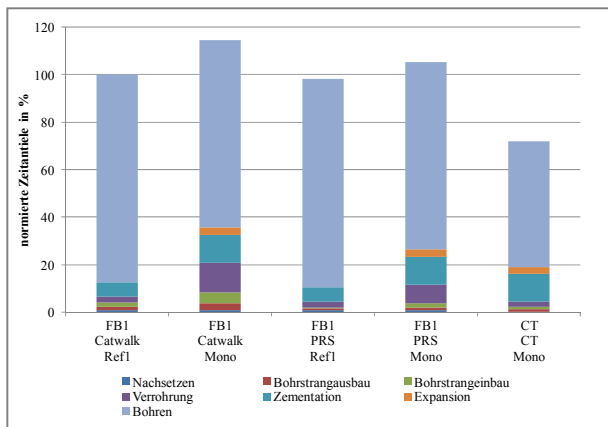


Abbildung 14. Berechnungsergebnisse der Gesamtzeiten für eine monobore Bohrlochkonstruktion mit einer Coiled Tubing-Bohranlage

Der Grund dafür liegt in einer nochmals gesteigerten Bohrgeschwindigkeit. Diese hohe ROP kann dadurch erzielt werden, dass mit einer geringeren Spüldichte gebohrt wird. Dieser Vorgang wird als „underbalanced drilling“ bezeichnet und ist aufgrund diverser Sicherheitsrisiken nur mit dem Coiled Tubing-Verfahren durchführbar, da ein CT-Strang eine bessere Kontrolle der Bohrlochhydraulik ermöglicht. Die Bohrgeschwindigkeit kann durch dieses Verfahren um den Faktor 1,5 bis 2 erhöht werden. In diesen Berechnungen wurde mit dem Faktor 1,5 gerechnet. Somit lassen sich die zeitlichen Nachteile der nichtproduktiven Prozesse bei monoboren Bohrlochkonstruktionen vollständig kompensieren und sogar zeitliche Einsparungen erzielen.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen dieses Beitrags ist ein Berechnungsmodell vorgestellt worden, mit dem das zeitliche Verhalten unterschiedlicher Bohranlagen, Handling-Systeme und Bohrverfahren bei der Herstellung von Bohrlochkonstruktionen abgebildet werden kann. Dieses Modell entstand auf der Basis umfangreicher Prozessanalysen und ist zur Untersuchung der Prozesszeiten an Tiefbohranlagen einsetzbar. Die Berechnungen der Prozesszeiten von unterschiedlichen Bohrlochkonstruktionen sowohl mit konventionellen als auch innovativen Tiefbohranlagen ergaben, dass die im gebo-Ansatz verfolgte monobore Bohrlochkonstruktion nicht zu zeitlichen Einsparungen führt, wenn konventionelle Rotary-Bohranlagen dafür verwendet werden. Durch den Einsatz neuer Bohranlagenkonzepte und Bohrverfahren, wie dem Coiled Tubing, sind durchaus deutliche zeitliche Einsparungen bei der Herstellung einer monoboren Bohrlochkonstruktion zu erwarten.

6 DANKSAGUNG

Die Forschung im Rahmen des Forschungsverbundes „gebo“ – Geothermie und Hochleistungsbohrtechnik – wurde und wird ermöglicht durch die finanzielle Unterstützung seitens des Niedersächsischen Ministeriums für Wissenschaft und Kultur (MWK) und der Firma Baker Hughes. Weiterhin möchte ich meinen Kollegen für die gute Zusammenarbeit danken.

LITERATUR

- [Ada85] Adams, Neil J.: *Drilling Engineering – A Complete Well Planning Approach*. Tulsa, Oklahoma, USA: PennWell Publishing Company, 1985. - ISBN: 0-87814-265-7.
- [AF09] Arnold, Dieter; Furmans, Kai: *Materialfluss in Logistiksystemen*. 6. erweiterte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – ISBN 973-3-642-01404-8
- [Ben13] Bentec, Heinrich-Otto: *Handbuch der Tief-, Flach-, Geothermie- und Horizontalbohrtechnik*. Wiesbaden Vieweg und Teubner Verlag, 2011. - ISBN: 978-3-8348-1278-0.
- [Buj10] Buja, Heinrich-Otto: *Handbuch der Tief-, Flach-, Geothermie- und Horizontalbohrtechnik*. Wiesbaden Vieweg und Teubner Verlag, 2011. - ISBN: 978-3-8348-1278-0.
- [Leh12] Lehr, Jörg: *Rotary Coiled Tubing Drilling and Completion Technology*. Patentschrift, 2012.- WO2012012632 A1.
- [RBY10] Rohde, Kjell; Berg, Tore; Yost, Tom; Aanesland, Svein Ove; Kudsk, Gregers: *Fully automated pipehandling system on a 6th generation drilling vessel*. Proceedings of the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, Vol. 2, 2010, New Orleans, Louisiana, USA. - ISBN: 978-16-1567906-5.
- [Rei09] Reich, Matthias: *Auf Jagd im Untergrund*. Bad Salzdetfurth: Add-Books, 2009. - ISBN: 978-3-00-028049-8.
- [ROO10] Reinicke, Kurt, M.; Ostermeyer, Georg-Peter; Overmeyer, Ludger; Teodoriu, Catalin; Thomas, Rüdiger: *Der Niedersächsische Forschungsverbund Geothermie und Hochleistungsbohrtechnik (gebo)*. DGMK/ÖGEW-Frühjahrs-tagung 2010, Celle

- [TL13] Teodoriu, C., Lehr, J.: *A Study of Various Monobore or Near-Monobore Well Construction Concepts with application to geothermal well drilling*, European Geothermal Congress 2013 Pisa, Italy, 3-7 June 2013
- [VBH11] Varahram, A.; Bär, F.; Hassel, Th.; Overmeyer, L.; Bach, Fr.-W.: *Design of Folded Tubulars for Expandable Casing Applications*. 16th Annual International Conference on Industrial Engineering Theory, Applications & Practice 2011, Stuttgart.

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer, Head of the Institute of Transport and Automation Technology of Leibniz University Hannover.

Ludger Overmeyer was born 1964 in Recke, Germany. Between 1984 and 1991 he studied Electrical Engineering at the University Hannover. 1996 he finished his doctorate in mechanical engineering at the University Hannover. From 1997 to 2001 he worked as project manager, division manager and head of research and development at Mühlbauer AG in Roding. Since 2001 Ludger Overmeyer is Professor at the Institute of Transport and Automation Technology of Leibniz University Hannover.

Address: Institute of Transport and Automation Technology, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Germany.

Phone: +49 511 762-3524, Fax: +49 511 762-4007, E-Mail: ludger.overmeyer@ita.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Florian Bär, Research Assistant at the Institute of Transport and Automation Technology of Leibniz University Hannover.

Florian Bär was born 1981 in Stadthagen, Germany. Between 2001 and 2008 he studied Mechanical Engineering at the Leibniz University Hannover. Since 2008 Florian Bär works as a research associate at the Institute of Transport and Automation Technology.

Address: Institute of Transport and Automation Technology, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Germany.

Phone: +49 511 762-3849, Fax: +49 511 762-4007, E-Mail: florian.baer@ita.uni-hannover.de

Dr. Dr.-Ing. Catalin Teodoriu, Research Assistant at the Institute of Petroleum Engineering of TU Clausthal.

Catalin Teodoriu was born 1972 in Ploiesti, Romania. Catalin Teodoriu is Head of Drilling, Completion and Workover sub-department Institute of Petroleum Engineering of TU Clausthal, Adjunct Assistant Professor in the Harold Vance Department of Petroleum Engineering at Texas A&M University since 2009 and Adjunct Professor at Oil and Gas University of Ploiesti, Romania, since 2012. He was an Assistant professor in the Harold Vance Department of Petroleum Engineering at Texas A&M University between 2006 and 2009. Dr. Teodoriu has an equivalent M.S. (1996) from "Oil and Gas" University of Ploiesti, Romania, and two Ph.D.s (2003 Technical University of Clausthal and 2005 – "Oil and Gas" University of Ploiesti). Dr. Teodoriu has worked as a R&D Engineer for two years with R&D Center of Petrom, Romania, over six years as researcher and later on as Research Supervisor with the Technical University of Clausthal.

Address: Institute of Petroleum Engineering, TU Clausthal, Agricolastr. 10, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Germany.

Phone: +49 5323-72-2611, Fax: +49 5323-72-3146, E-Mail: catalin.teodoriu@tu-clausthal.de