

# Erfolgsfaktoren bei Projekten der Tiefengeothermie – Erfahrungen aus dem Bayerischen Molassebecken

Factors for the Success of Deep Geothermal Projects – Experience from the Bavarian Molasse Basin

Von I. SCHULZ, U. STEINER und A. SCHUBERT\*

## Abstract

With over 15 years' experience and over 50 drilled wells, a positive success story for the development of deep geothermal projects in Bavaria can be reflected on. This success can be attributed to the ideal geothermal conditions and the continual adoption of the technology by the city of Munich, and the surrounding area, since the turn of the century. However, the development has been far from constant and experienced many 'ups and downs' caused by changes in environmental policy and global financial crises.

Through project experience and extensive research projects in the last 10 years many aspects have been optimized and positively impacted the success of the wells as well as the cost of the drilling. With the help of location specific seismic data forming the basis of the geological model and the systematic 'lessons learnt' analysis of well engineering data from completed wells, exploration optimized and risk minimized well planning has been possible. This optimized planning leads to significantly quicker drilling times and therefore a reduction in costs. An example of this is the geothermal project in Unterföhring on the north-eastern side of Munich, which recently, following the successful expansion of the project, became Germany's first double doublet. This project demonstrates the success of the 'lessons learnt' approach.

## Kurzfassung

Die Tiefe Geothermie in Bayern kann mittlerweile auf eine über 15-jährige Erfolgsgeschichte mit über 50 Bohrungen zurückblicken. Aufgrund der günstigen geothermischen Bedingungen setzt vor allem die Region um München seit der Jahrtausendwende stark auf die Nutzung geothermischer Energie. Die Entwicklung ist dabei nicht im-

\* I. Schulz, U. Steiner, A. Schubert, ERDWERK GmbH, München (E-mail: Schulz@erdwerk.com).

0179-3187/17/2  
© 2017 EID Energie Informationsdienst GmbH

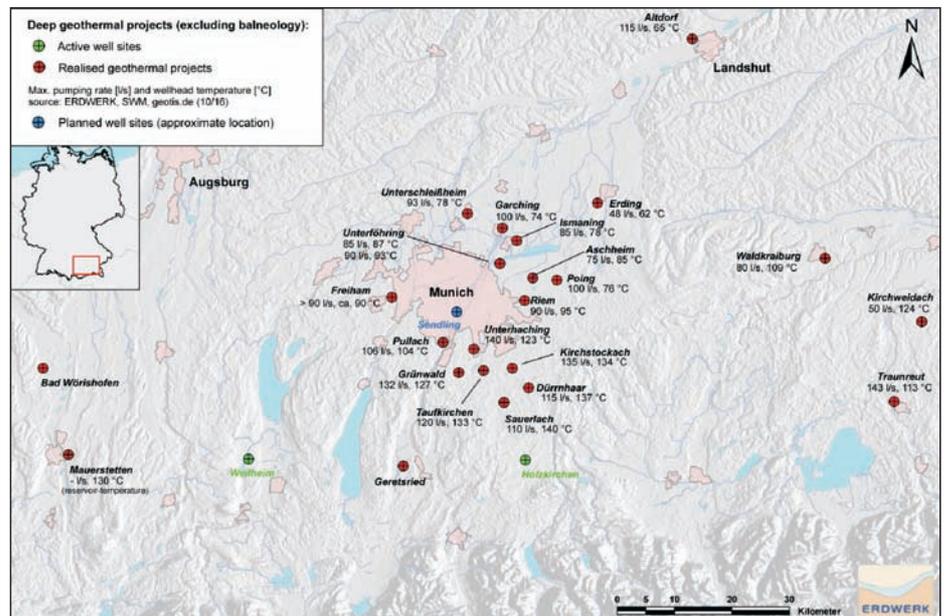


Abb. 1 Übersicht der abgeschlossenen, aktiven und geplanten Geothermieprojekte im Umgriff von München (Status Oktober 2016)

mer kontinuierlich gewesen, sondern geprägt von »Ups and Downs«, ausgelöst vor allem durch umweltpolitische Entscheidungen und globalen Finanzkrisen, vereinzelt aber auch durch Bohrergebnisse, die die Erwartungen nicht erfüllen konnten.

Dank der zunehmenden Projekterfahrungen und zahlreicher Forschungsprojekte konnte in den letzten Jahren eine Vielzahl von Geothermieprojekten durch verschiedenste Maßnahmen optimiert werden – sowohl hinsichtlich der erzielten Fündigkeiten als auch hinsichtlich der Bohrkosten. Mit Hilfe standortspezifischer seismischer Daten als Grundlage für das geologische Modell als auch durch Analyse bohrtechnischer »Lessons Learnt« vergangener Bohrungen kann eine sowohl fündigkeitsoptimierte als auch risikominimierte Bohrplanung erfolgen, die zu signifikant schnelleren Bohrzeiten und damit geringeren Kosten führt. Am Beispiel des Geothermieprojektes Unterföhring im Nordosten von München, das jüngst zur deutschlandweit ersten Doppeldoublette erweitert worden ist, werden die erfolgreiche

umgesetzten »Lessons Learnt« näher beleuchtet.

## Überblick zur Entwicklung der Geothermie in Bayern

Viele der ersten Thermalwasserfunde im Alpenvorland wurden im Zuge der Suche nach Erdöl zufällig angetroffen. So wurden beispielsweise 1938 die Thermalwasservorkommen im Oberjura (Malm) in Bad Füssing entdeckt. Diese zunächst als Misserfolg angesehene Bohrung stellte sich für die Region im Laufe der Jahre als Segen heraus: heute ist diese Gegend in Niederbayern zusammen mit den Thermalwasserquellen in Bad Griesbach und Bad Birnbach als Bäderdreieck über Deutschland hinweg bekannt.

Über Jahrzehnte hinweg beschränkte sich die Erschließung und Nutzung des Thermalwassers im Alpenvorland im Wesentlichen auf balneologische Projekte. Die ersten, speziell auf eine energetische Nutzung des Thermalwassers ausgerichtete Bohrungen

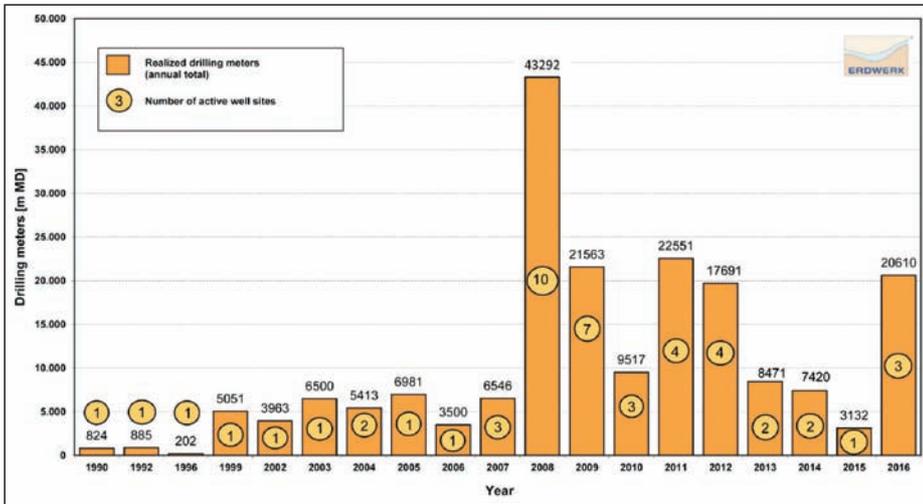


Abb. 2 Entwicklung der geothermischen Bohraktivitäten anhand der jährlich umgesetzten Bohrmeter (Stand Januar 2017)

wurden ab Anfang der 1990er Jahre im niederbayerischen Straubing und dem grenzüberschreitenden Projekt Simbach-Braunau im östlichen bayerischen Molassebecken initiiert.

Die Entwicklung der Geothermie im zentralen Molassebecken rund um München begann nach der Jahrtausendwende, etwa vor 15 Jahren. Die ersten Wärmeprojekte entstanden in Unterschleißheim, Riem und Pullach i. Isartal, sowie Unterhaching als das erste, auf Verstromung hin ausgerichtete Geothermieprojekt (Abb. 1). Ein hohes Maß an Pioniergeist kombiniert mit großem Idealismus und strategischer Weitsicht waren damals nötig, um diese ersten Projekte zu verwirklichen.

Abbildung 2 zeigt in einer Übersicht die Entwicklung der tiefeingeothermischen Explorationstätigkeit im Bayerischen Molassebecken seit 1990 in Bezug auf die abgeteufte Bohrmeter. Balneologische Projekte sind in dieser Übersicht nicht berücksichtigt.

Mit Erscheinen des Bayerischen Geothermieatlas im Jahr 2004, der erstmals umfassend das tiefeingeothermische Potenzial in Bayern aufzeigte, und der Novellierung des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG), die eine deutliche Anhebung der Vergütung für Strom aus Geothermieanlagen zusicherte, wurde das Bewusstsein für die geothermische Energiegewinnung geweckt, was zu einem sprunghaften Anstieg an Bergrechtskonzessionen führte. Nach der Einführung des Marktanreizprogramms mit zinsvergünstigten Darlehen und Investitionszuschüssen für geothermische Wärmeproduktion im Jahr 2007 erreichte die Geothermie in Bayern im Jahr 2008 ihren bisherigen Höhepunkt: Die Anzahl an aktiven Bohrstandorten in und um München stieg auf acht an, und es wurden in den Jahren 2008/2009 über 60.000 Bohrmeter abgeteuft. In dieser Zeit kamen neben zahlreichen hydrothermalen Wärmeprojekten wie Unterföhring, Aschheim, Garching, Poing und Erding auch die drei Stromprojekte Sauerlach, Dürnrhaar und Kirchstockach zur Ausführung [1].

In den Folgejahren 2009 und 2010 ging die Bohrtätigkeit markant zurück, da zum einen die Auswirkungen der globalen Finanzkrise maßgeblich bei den tiefen und investitionsintensiven Stromprojekten zu zeitlichen Verzögerungen oder sogar zum Aussetzen jeglicher Aktivitäten führte. Zum anderen wurde vor allem den Inhabern von Stromkonzessionen die Komplexität geothermischer Projekte deutlich, die eine gleichzeitige Kraftwerksplanung und Entwicklung weiterer Felder schwierig machte.

Mit der Atomkatastrophe von Fukushima rückte auch die Geothermie wieder mehr in den Fokus der Öffentlichkeit und belebte in den Jahren 2011 und 2012 den geothermischen Markt (Taufkirchen, Ismaning, Altdorf). Vor allem aber die Stabilisierung der Finanzmärkte und die Möglichkeit einer Fündigkeitsversicherung führte zu verstärkter Planungsaktivität. Ebenso wurde durch die Projekte Waldkraiburg, Kirchweidach, im Jahr 2012 auch Traunreut die geothermische Erschließung des östlichen und südöstlichen Molassebeckens begonnen. Die positive Erfahrung aus dem bisherigen Betrieb führte in Pullach i. Isartal dazu, das erfolgreich laufende Projekt um eine dritte Bohrung zu erweitern.

In den Jahre 2013 bis 2015 erlebte die Geothermie erneut einen Einbruch. Einerseits wurden potenzielle Projektentwickler durch die politischen Diskussionen über eine Novellierung des EEG verunsichert, zum anderen erfuhr die Entwicklung von geothermischen Verstromungsprojekten durch die nicht fündige Bohrung Geretsried (2013) südlich von München einen starken Dämpfer, so dass viele Projekte,

die als »drill-ready« in den Startlöchern standen, nicht umgesetzt wurden.

Seitdem stehen in Bayern derzeit eher Wärmeprojekte im Vordergrund. So wurde die im Jahr 2009 abgeteufte kommunale Dublette in Unterföhring aufgrund steigender Wärmenachfrage 2014 um zwei weitere Bohrungen zu der deutschlandweit ersten Doppeldublette erfolgreich ausgebaut. Der BMW-Konzern stieg 2014 mit dem zukunftsweisenden Forschungsprojekt der Wärmespeicherung für sein Werk Dingolfing in die geothermischen Aktivitäten ein. Die Stadtwerke München – seit 2003 mit der Wärmeversorgung im Münchner Stadtteil Riem ein Pionier in Sachen Geothermie – haben mit der Dublette im Münchner Stadtteil Freiham im Jahr 2015/2016 einen weiteren Baustein für die geothermische Wärmeversorgung in München gelegt. Die derzeit laufenden Bohrarbeiten in Holzkirchen setzen die geothermische Erschließung im Süden von München wieder in Gang. Das kommunale Projekt soll das Gemeindegebiet mit geothermisch erzeugter Wärme versorgen; zudem ist die ergänzende Verstromung geplant. Die 5.600 m tiefe erste Bohrung wurde bereits erfolgreich getestet. Derzeit (Stand Jan. 17) laufen die Arbeiten an der zweiten Bohrung.

Bislang wurden seit 1990 insgesamt knapp 200 Bohrkilometer im Rahmen von Tiefengeothermieprojekten in Bayern abgeteuft, der überwiegende Teil (>150 km) davon seit 2008. Von bisher über 50 Bohrungen wurden bis dato lediglich bei zwei Projekten (Mauerstetten und die mit 6.036 m bisher tiefste Geothermiebohrung in Geretsried) nicht die erhofften Schüttungen erzielt, um in den Betrieb gehen zu können.

### Räumliche Verteilung der geothermischen Standorte

Hinsichtlich der räumlichen Verteilung der geothermischen Standorte kann München auch als Geothermiehauptstadt Deutschlands angesehen werden (Abb. 1). Zum einen zeichnet sich München als Metropolregion durch eine hohe Finanzkraft mit hoher Bevölkerungsdichte und einem hohen Wärme- und Energiebedarf aus. Zum

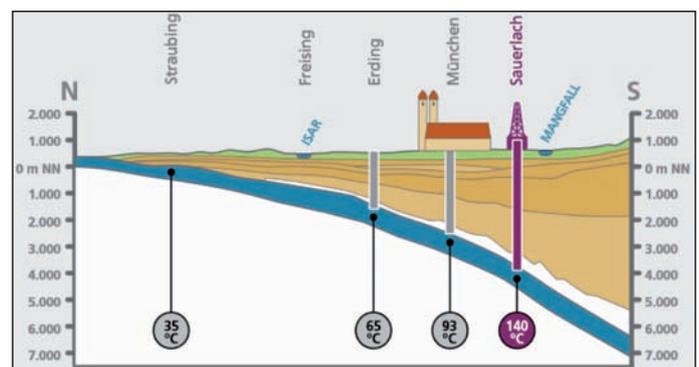


Abb. 3 Geologischer Nord-Süd-Schnitt durch das Voralpenland. Der Malm-Tiefgrundwasserleiter (blau) mit darüber liegenden Molasse-sedimenten (beige) und Darstellung ausgewählter Geothermiebohrungen mit Temperaturangaben [2]

anderen sind die geologischen Voraussetzungen im Raum München besonders geeignet für eine hydrothermale Nutzung des jurassischen Thermalwassers: Mit einer moderaten Tiefe um ca. 2.500 m unter München weist das Thermalwasser eine Temperatur zwischen ca. 65 und ca. 95 °C auf. Mit zunehmender Tiefe des Malm-Tiefengrundwasserleiters in Richtung Alpen steigt auch die Temperatur des Thermalwassers (Abb. 3).

Abbildung 4 zeigt die Lage der zurzeit über 40 Erlaubnis- (rot) und Bewilligungsfelder (schwarz) in Bayern im Zusammenhang mit der Temperaturverteilung in 2.000 m unter NN und veranschaulicht damit das erschlossene und noch zu erschließende/erschließbare Potenzial. Die negative Temperaturanomalie im Kern der Wasserburger Senke östlich von München ist deutlich zu erkennen. Aufgrund der dort zu erwartenden geringeren Reservoirtemperaturen sind diese Bereiche derzeit nicht im Fokus geothermischer Exploration. In Richtung Süden zu den Alpen hin nimmt der geothermische Gradient ab.

Nördlich und im Stadtgebiet von München wird das Thermalwasser aufgrund Temperaturen bis max. ca. 100 °C ausschließlich für die Fernwärmeversorgung genutzt. Aufgrund der finanziellen Langfristigkeit dieser Projekte mit hohen Anfangsinvestitionen für Bohrungen und dem Bau bzw. Ausbau der Fernwärmenetze liegen Wärmeprojekte meist in kommunaler Hand bzw. unter kommunaler Beteiligung.

Im Süden von München ist aufgrund der größeren Tiefenlage der Malmkarbonate und der dadurch anzutreffenden höheren Temperaturen von >120 °C auch eine Stromgenerierung möglich. So produzieren beispielsweise die Geothermiebohrungen in Dürnrhaar und Kirchstockach jeweils 5,5 MW elektrisch; in der Anlage in Sauerlach können 5 MW elektrisch und 4 MW thermisch genutzt werden [2].

Die Ergebnisse der geothermischen Exploration bis heute lassen für den Zeitraum nach 2016 eine positive Weiterentwicklung erwarten. Großes Potenzial liegt weiterhin im Bereich der geothermischen Wärmenutzung, wie sie z. B. von den Stadtwerke München (SWM) im Stadtgebiet München konsequent verfolgt wird. Auch die Nutzung des Malm als hydrothermalen Wärmespeicher (s. o., BMW-Standort Dingolfing) ist als eine zukunftssträchtige Entwicklung anzusehen, zumal hier auch Gebiete mit geringeren Thermalwassertemperaturen als 60 °C genutzt werden können. Mit Spannung werden zudem die Ergebnisse der Bohrungen in Weilheim erwartet, welche die geothermischen Explorationen im Südwesten des Molassebeckens reaktivieren. Die Bohrungen haben Ende Oktober 2016 begonnen und sollen nach Unterhaching, Sauerlach, Dürnrhaar, Kirchstockach, Taufkirchen und Grünwald die geothermische Verstromung im zentralen bis südwestlichen Molassebecken erweitern.

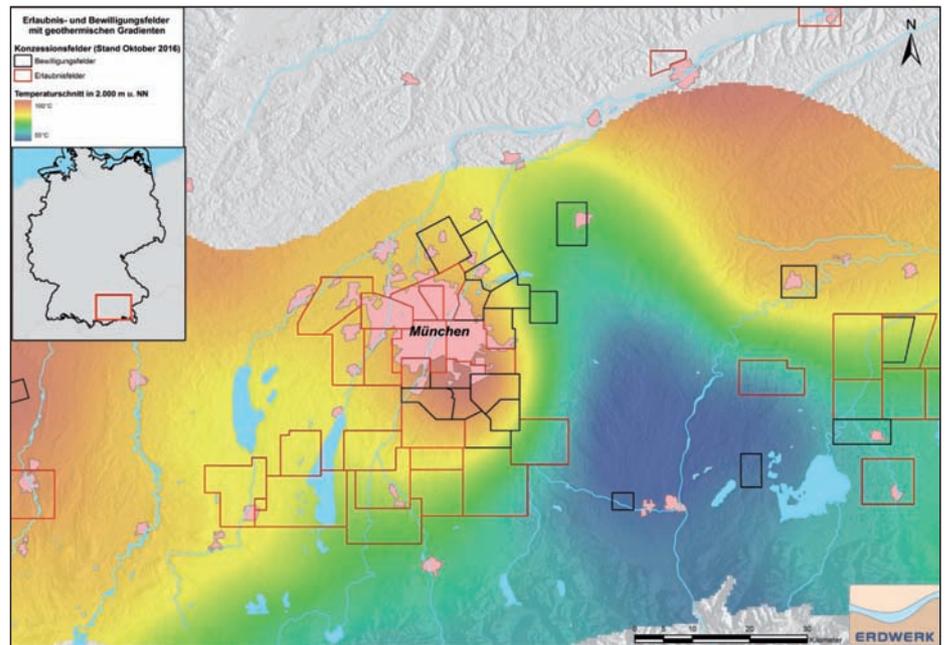


Abb. 4 Übersicht zu den aktuellen Erlaubnis- und Bewilligungsfeldern mit einem Temperaturschnitt aus 2.000 m u. NN [3]

Der Wissenszuwachs aus erfolgreich umgesetzten Projekten, die steigenden Erwartungen hinsichtlich Fündigkeit und Kostenoptimierung der Bohrungen sowie die steigenden Ansprüche an die Bohrtechnik aufgrund immer größerer Bohrtiefen und nicht zuletzt auch die zunehmende Verdichtung an Projekten haben bei der hydrothermalen Geothermie im Verlauf der Jahre in allen Projektphasen, von der Reservoirerkundung und -planung, der Reservoirerschließung bis hin zur -bewirtschaftung, zu einer Vielzahl an Optimierungsprozessen geführt, die sich im Wesentlichen an Arbeitsprozessen der Kohlenwasserstoffindustrie (Seismic-to-Production-Workflow) orientieren. Einige dieser positiven Entwicklungen und Optimierungsmaßnahmen werden im Folgenden exemplarisch vorgestellt.

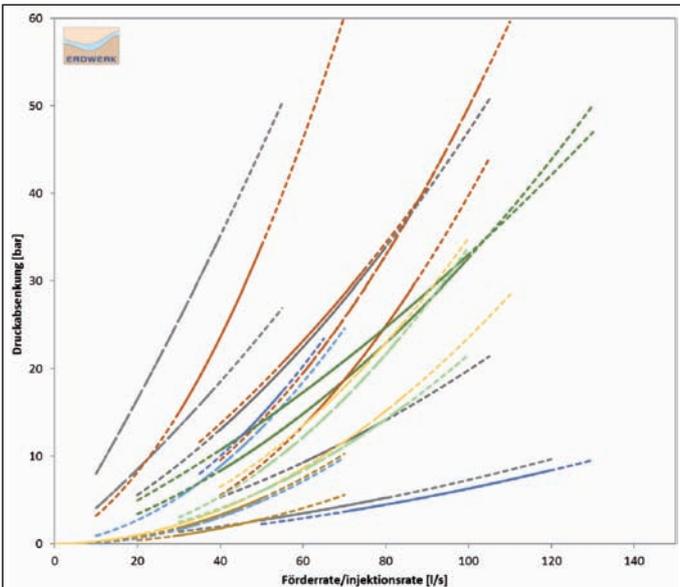
### Reservoirerkundung

Grundlage aller geologischen und bohrtechnischen Planungsschritte ist ein fundiertes geologisches Modell. Die Kenntnis über geologische Parameter des Reservoirs inklusive dessen fazieller Ausbildung und der darüber liegenden, zu durchteufenden Schichten sowie die Identifizierung von problematischen Bereichen ist eine Grundvoraussetzung für eine fündigkeitsoptimierte und risikominimierte sowie auf Performance ausgelegte Bohrplanung. Eine wichtige Grundlage hierfür sind seismische Daten. Wurden die ersten Projekte noch ausschließlich auf Basis von reprozessierter 2D-Altseismik aus den 1970/1980er Jahren geplant und abgeteuft, so entwickelte sich die Durchführung einer auf den Standort und auf das Target angepassten Seismikkampagne mittlerweile zum Standard. Gerade bei Stromprojekten mit hohen Fündigkeitserwartungen und hohen Investitionssummen ist eine 3D-seismische Erkun-

dung nicht mehr wegzudenken. Mittlerweile wurden in Bayern 14 3D-seismische Surveys mit einer Gesamtfläche von über 1.000 km<sup>2</sup> für hydrothermale Geothermieprojekte durchgeführt.

Die jüngste und über Deutschlands Grenzen hinaus bekannte 3D-Seismikerkundung ist die seismische Messkampagne der SWM im Stadtgebiet von München. Die Untersuchungen, zu denen neben einer 3D-Seismik auch vier 2D-Linien, zwei Geophonversenkungen in den Bohrungen Freiham und Riem sowie ein in Zusammenarbeit mit dem Leibnitz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) durchgeführtes Scherwellenexperiment gehören, werden im Rahmen des Verbundprojektes GRAME vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie mit 50 % gefördert. Das Projekt steht in Zusammenhang mit der »SWM-Vision 2040«: Bis 2040 soll München die erste deutsche Großstadt werden, in der Fernwärme zu 100 % aus regenerativen Energien gewonnen wird [4]. Den wesentlichen Beitrag hierzu wird die Geothermie liefern.

Mit Hilfe der seismischen Messungen wurde der Untergrund unter München erstmals großräumig erfasst um mögliche Bohrstandorte zu verifizieren. Dabei musste eine Fläche von ca. 170 km<sup>2</sup> in überwiegend innerstädtischem Bereich seismisch vermessen werden. Etwa 1.000 km Messkabel mit zahlreichen Straßenüberquerungen waren zu diesem Zwecke zwischen November 2015 und März 2016 auf nahezu der Hälfte des Stadtgebietes von München ausgelegt. Die seismische Anregung erfolgte mittels dreier 26 t schwerer Vibrofahrzeuge, die im Konvoi kreuz und quer das südliche Stadtgebiet Münchens abtasteten – eine logistische Herausforderung für eine Großstadt mit großem Verkehrsaufkommen, enger Bebauung mit z. T. historischen Gebäuden und einem



**Abb. 5** Produktivitätskurven von 20 Geothermiebohrungen aus dem Großraum München (verändert nach [6]); gestrichelten Kurven zeigen aus Pumpversuchen extrapolierte Werte; Bohrungen des gleichen Geothermieprojektes sind in der gleichen Farbe dargestellt; die Ergebnisse wurden nicht korrigiert (Turbulenzen, Skineffekte, Bohrdurchmesser etc.)

engen Netz an Versorgungsleitungen und Untertunnelungen. Dank langer und intensiver Vorbereitungen konnten die Messungen nahezu problemlos durchgeführt und abgeschlossen werden. Aktuell laufen die Auswertungen der Messkampagne.

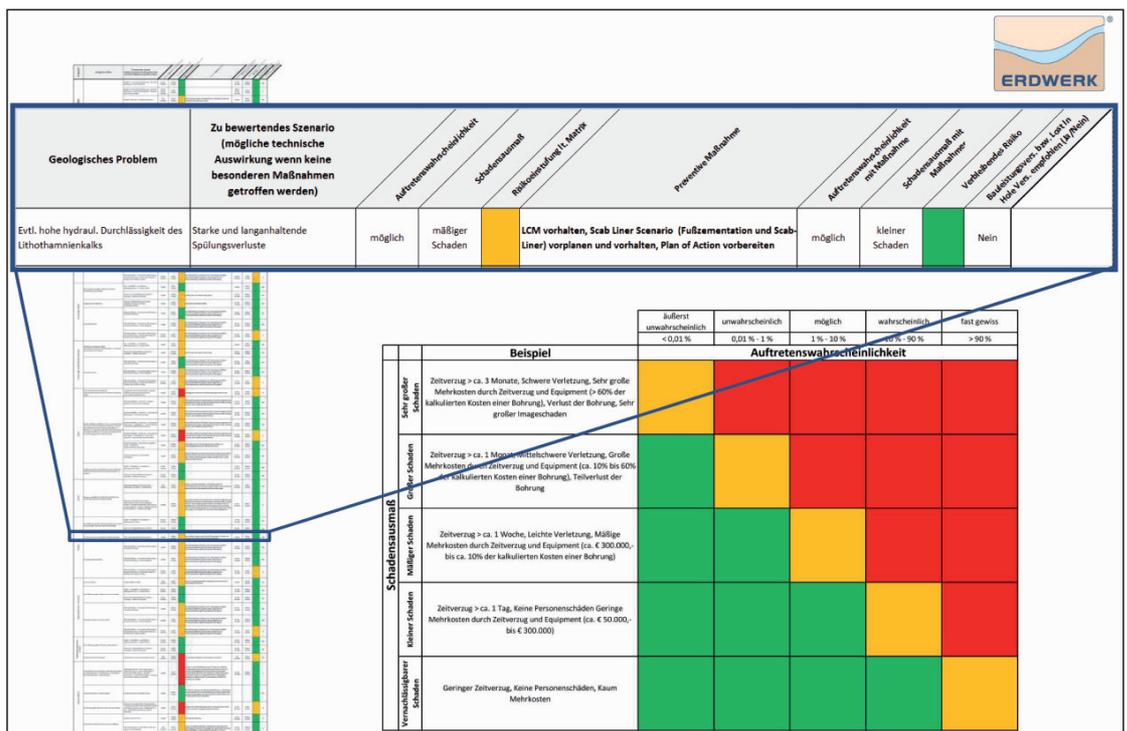
**F**ündigkeitsoptimierte und Risikominimierte Bohrpfadplanung

In der frühen Anfangsphase galt der an seiner Oberfläche tiefgründig verkarstete Obere Malm als wesentliches Erschließungsziel hydrothormaler Bohrungen. Im Zuge der voranschreitenden Exploration wurden dann zusätzlich Störungen mit Klüftporosität und assoziierten Karstphänomenen als weitere Bohrziele definiert. Eine umfassende Auswertung von den im Großraum München vorhandenen Bohrungen im Jahr 2010 zeigte schließlich, dass die Fündigkeiten einzelner Bohrungen aber maßgeblich von der angetroffenen Lithofazies gesteuert werden. Demnach wirkt sich die in Riffstrukturen angetroffene dolomitisierte Massenfazies zusammen mit einem dort bevorzugtem Verkarstungspotenzial günstig auf die Produktivität einer Bohrung aus. Bohrungen, die dagegen in geschichteter

Beckenfazies abgeteufte wurden, zeichnen sich generell durch geringere Produktivitäten aus [5]. Dementsprechend stellen Störungen zwar weiterhin Bohrziele dar, sind aber in erster Linie als hydraulisches Element anzusprechen, welches das Bohrloch besser an das Reservoir anschließt. Abbildung 5 stellt in einem Diagramm mit Druckabsenkung versus Förderrate die angetroffenen Produktivitäten in bisher 20 untersuchten Bohrungen aus dem Großraum München dar. Dabei sind Bohrungen des gleichen Geothermieprojektes durch eine gleiche Farbgebung gekennzeichnet. Die hohe Varianz der angetroffenen Produktivitäten selbst innerhalb eines Geothermieprojektes, bei dem die beiden Dublettenbohrungen an Top Malm lediglich horizontale Entfernungen von 1,3 bis max. 3 km zueinander aufweisen, spiegeln diese oben beschriebenen, sich kleinräumig ändernden Faziesbereiche wider [6]. Hydraulische Simulationen haben zudem gezeigt, dass durch technische Maßnahmen wie einer möglichst langen Filterstrecke innerhalb der produktiven Bereiche des Malm oder Sidetrackoptionen die Fündigkeit einer

Bohrung weiter optimiert werden kann [5]. Die hohe Standfestigkeit der Malmkarbonate ermöglicht Bohrpfade mit hohen Neigungswinkeln von 60° und mehr (bis in die Horizontale), so dass Reservoiraufschlüsse von 1.000 m MD und mehr gebohrt werden können. Dies erlaubt ein »Auffädeln« von günstigen Faziesbereichen, Störungen und Verkarstungen und erhöht so generell die Fündigkeit. Neben den Vorgaben eines fündigkeitsoptimierten Bohrpfades gilt es aus bohrtechnischer Sicht, eine möglichst risikominimierte Bohrung zu planen, wobei einfache Geometrien mit geringen Aufbauwinkeln oberhalb der standfesten Malmkarbonaten bevorzugt werden. Heute wird üblicherweise für jede neue Bohrung eine eigene Risikobewertung (Abb. 6) vorgenommen, die nach einem vorgegebenen Schema abläuft. Zunächst werden hierbei die möglichen geologischen und bohrtechnischen Probleme entlang des Bohrpfades identifiziert und die damit einhergehenden möglichen bohrtechnischen Hazard-Szenarien benannt. Anhand einer Risikomatrix mit einer visuellen Kennzeichnung nach einer entsprechenden Farbskala (rot – gelb – grün) erfolgt unter Berücksichtigung der Auftretswahrscheinlichkeit und des maximal zu erwartenden Schadensausmaßes eine Einstufung, ob das Risiko als akzeptabel (grün) oder inakzeptabel (rot) zu bewerten ist. Für schwer akzeptable Risiken werden Maßnahmen ermittelt, die entweder die Auftretswahrscheinlichkeit oder das Schadensausmaß verringern und damit zum akzeptablen Risiko herabgestuft werden können. Diese Maßnahmen können beispielsweise der Einsatz oder das präventive Vorhalten von speziellem Equipment, die Einstellung

Bohrung weiter optimiert werden kann [5]. Die hohe Standfestigkeit der Malmkarbonate ermöglicht Bohrpfade mit hohen Neigungswinkeln von 60° und mehr (bis in die Horizontale), so dass Reservoiraufschlüsse von 1.000 m MD und mehr gebohrt werden können. Dies erlaubt ein »Auffädeln« von günstigen Faziesbereichen, Störungen und Verkarstungen und erhöht so generell die Fündigkeit. Neben den Vorgaben eines fündigkeitsoptimierten Bohrpfades gilt es aus bohrtechnischer Sicht, eine möglichst risikominimierte Bohrung zu planen, wobei einfache Geometrien mit geringen Aufbauwinkeln oberhalb der standfesten Malmkarbonaten bevorzugt werden. Heute wird üblicherweise für jede neue Bohrung eine eigene Risikobewertung (Abb. 6) vorgenommen, die nach einem vorgegebenen Schema abläuft. Zunächst werden hierbei die möglichen geologischen und bohrtechnischen Probleme entlang des Bohrpfades identifiziert und die damit einhergehenden möglichen bohrtechnischen Hazard-Szenarien benannt. Anhand einer Risikomatrix mit einer visuellen Kennzeichnung nach einer entsprechenden Farbskala (rot – gelb – grün) erfolgt unter Berücksichtigung der Auftretswahrscheinlichkeit und des maximal zu erwartenden Schadensausmaßes eine Einstufung, ob das Risiko als akzeptabel (grün) oder inakzeptabel (rot) zu bewerten ist. Für schwer akzeptable Risiken werden Maßnahmen ermittelt, die entweder die Auftretswahrscheinlichkeit oder das Schadensausmaß verringern und damit zum akzeptablen Risiko herabgestuft werden können. Diese Maßnahmen können beispielsweise der Einsatz oder das präventive Vorhalten von speziellem Equipment, die Einstellung



**Abb. 6** Beispiel einer Risikobewertung mit Risikomatrix

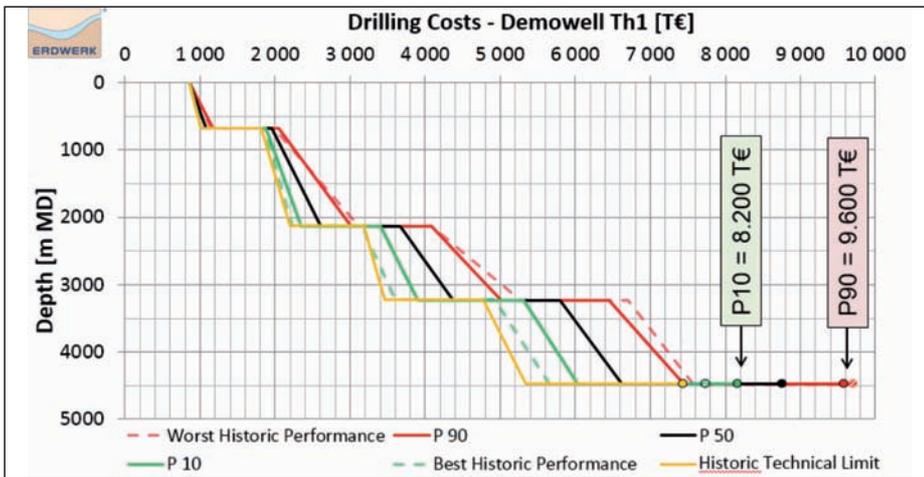


Abb. 7 Bohrkosten versus Tiefe für eine Beispielbohrung in der Bayerischen Molasse

bestimmter technischer Parameter oder Planung von Arbeitsabläufen bei Eintreten von Schadensszenarien sein [6]. Im Falle einer Beeinträchtigung ist so eine schnelle, kostensparende Reaktion möglich. Nach mehreren Problemen durch Bohrchinstabilitäten mit herkömmlichen Bohrgarnituren hat sich mittlerweile das automatisierte Richtbohrverfahren Rotary Steerable System (RSS) in den meisten Projekten der Geothermie etabliert. Sein Einsatz gilt als effiziente, risikominimierende Maßnahme, da geologisch-bohrtechnisch riskante Sektionen schneller durchteuft werden können. Zudem sind diese Bohrlöcher üblicherweise maßhaltiger und gleichmäßiger und verringern so potenzielle Probleme beim Rohreinbau und der Zementation. Erwähnenswert ist, dass die deutlich höheren Kosten für den RSS-Einsatz üblicherweise durch den schnelleren Bohrfortschritt kompensiert werden können.

### Kostenschätzung und kosteneffizientes Bohren

Neben der Fündigkeit ist der Erfolg eines Geothermieprojektes natürlich auch maßgeblich von einem kosteneffizienten Bohren und der Einhaltung des eingeplanten Projektbudgets abhängig. Bei den heute auch in der Geothermie üblichen »Day-Rate«-Bohrverträgen ist ein Großteil der anfallenden Kosten zeitabhängig. Neben einer Reduktion der Bohrzeit durch den standardmäßigen Einsatz von automatisierten Richtbohrsystemen (s. o.) können auch durch optimierte technische Maßnahmen und Prozesse, wie sie z. B. aus der oben beschriebenen Risikobewertung hervorgehen (z. B. Vorhalten von speziellem Equipment wie z. B. Scab-Liner im Fall von Bohrproblemen, Anpassung der Bohr- oder Spülungsparameter etc.) die zeitabhängigen Kosten reduziert werden. Unerlässliche Maßnahme dafür ist die ausführliche bohrtechnische Analyse im Anschluss jeder abgeteuften Bohrung, um dadurch die Erfahrungen in die nächsten Bohrungen

kostenmindernd einfließen zu lassen (»Lessons Learnt«). Im Planungsstadium ist eine fundierte Kostenschätzung für den weiteren Projektverlauf häufig entscheidend. Durch die steigende Anzahl an Bohrungen und deren systematische bohrtechnische Auswertung ist es mittlerweile möglich, auf Basis von Erfahrungswerten über einen statistischen Ansatz eine zuverlässige Zeit- und daraus resultierend eine Kostenabschätzung anzuwenden. Zur Ermittlung der statistischen Bandbreite der Gesamtbohrzeit werden die Zeiten der einzelnen Arbeitsschritte einer jeden Bohrsektion mit einer Monte Carlo-Simulation simuliert und die verschiedenen Eintrittswahrscheinlichkeiten z. B. als Zeit-Tiefen-Diagramm bzw. unter Berücksichtigung der Kosten als Kosten-Tiefen-Diagramm (Abb. 7) dargestellt. Diese Art der Kostenschätzung ist zwar aufwändiger, hat aber gegenüber einfacheren Methoden den Vorteil, dass sie die Erfahrungen aus den vorangegangenen Projekten nachvollziehbar integriert und individuell für jede Bohrung an-

gepasst werden kann, indem spezifische Unsicherheiten entsprechend gewichtet werden [8].

Eine statistisch ermittelte Zeit-Tiefen-Prognose kann sich darüber hinaus günstig auf die Bohrperformance auswirken. Bereits ein geringeres Abweichen von der zeitlichen Vorgabe ist als Frühwarnung zu sehen, bei dem die eingesetzten Prozesse und Materialien kritisch hinterfragt werden und ggf. Maßnahmen ergriffen werden können. Gleichzeitig können die mit anderen Bohrungen jederzeit vergleichbaren Zeitvorgaben Ansporn für einen sportlichen Wettbewerb unter den Bohrfirmen sein, wie die Vergangenheit bereits zeigte.

Auch im Hinblick auf das Gesamtprojektmanagement kann die Kostenmodellierung als Teil einer Sensitivitätsanalyse fungieren, in dem damit die technischen und finanziellen Schlüsselstellen einer Bohrung identifiziert werden und als Konsequenz daraus Optimierungsstrategien entwickelt werden können.

Einschränkend ist jedoch festzuhalten, dass diese Art der Kostenschätzung einen mehr oder weniger ungestörten Bohrungsverlauf voraussetzt, wie er bei Bohrungen mit gut prognostizierbaren Druck- und Temperaturverhältnissen anzunehmen ist. Schwerere Schäden sind auch mit diesem statistischen Ansatz nicht darstellbar. Speziell Standorte mit sehr großen Bohrtiefen (>4.000 m TVD) nahe am Alpenrand zeigen nach wie vor die Grenzen dieser Kostenprognose auf.

### Projektbeispiel Unterföhring (2005–2016)

Ein gutes Beispiel für die Erfolgsgeschichte der Geothermie in Bayern bildet das kommunale Geothermieprojekt Unterföhring im Nordosten von München (Abb. 8).

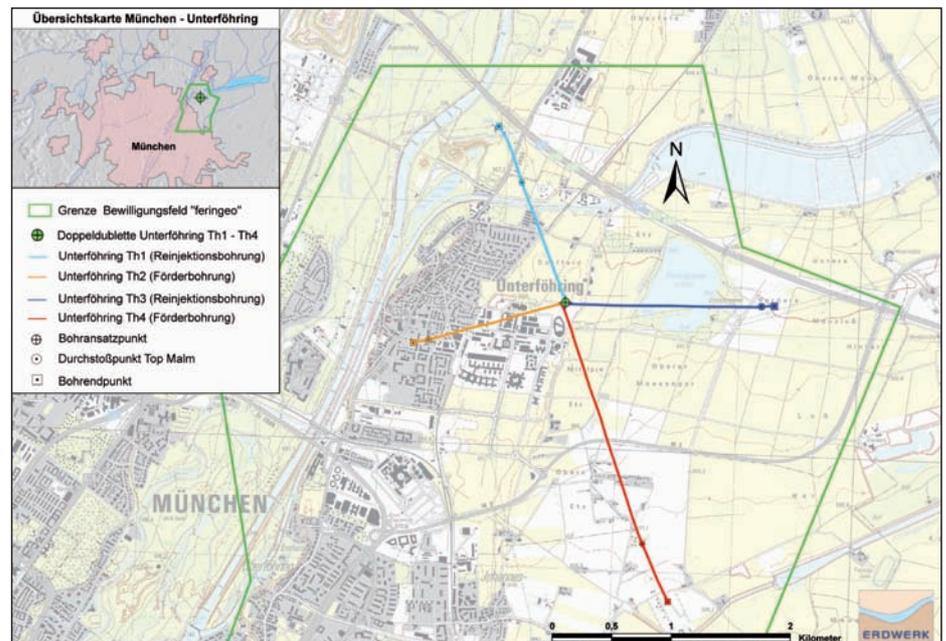


Abb. 8 Übersicht der Bohrpfade der Doppeldublette Unterföhring in der Aufsicht

Tabelle 1 Projektchronologie Unterföhring

Unterföhring Th1, Th2	
06/2005	Erlaubnis zur Aufsuchung von Erdwärme
11/2006	2D-Seismische Untersuchungen (2 Linien)
09/2007	Gründung der Geovol Unterföhring GmbH
04/2008	Erteilung Bohrauftrag (hydrothermale Dublette Th1 & Th2)
06/2008	Spatenstich auf dem Bohrgelände
06/2008	Baubeginn Fernwärmenetz
11/2008	Bohrbeginn »Thermal 1«
05/2009	Fündigkeit »Thermal 2«
12/2009	Beginn der Wärmeversorgung aus Geothermie
01/2010	Erlaubnis zur Gewinnung von Erdwärme
Unterföhring Th3, Th4	
01/2011	1. Konzeptplanung Erweiterung Th3/Th4
11/2011	Reservoirmodellierung Th1–Th4
05/2012	weitere 2D-Seismik (3 Linien)
09/2012	Abschluss Detailplanung Th3/Th4
10/2012	EU-weite Ausschreibung Th3/Th4
05/2013	Bietergespräche und Vergabe der Bohrleistungen
01/2014	Ausführungsplanung Th3/Th4
02/2014	Bohrbeginn Th4
07/2014	Ende hydraulische Testarbeiten Th3 = Fertigstellung Doppeldublette

Mit der Sicherung des Claims im Jahr 2005 ist das Projekt Unterföhring unter regelmäßiger Einbeziehung innovativer Aspekte unter der Federführung der Geovol GmbH als 100 %-iger Tochter der Gemeinde Unterföhring konsequent entwickelt worden und

Tabelle 2 Rahmendaten zu den Bohrungen Unterföhring Th1–Th4

	Th1 Reinjektionsbohrung	Th2 Förderbohrung	Th4 Förderbohrung	Th3 Reinjektionsbohrung
ET MD	3.042 m	2.578 m	3.897 m	3.050 m
ET TVD	2.512 m	2.124 m	2.340 m	2.053 m
Malmstrecke	757 m MD / 554 m TVD	202 m MD / 154 m TVD	615 m MD / 311 m TVD	167 m MD / 76 m TVD
Bohrtage bis ET	71 d	52 d	48 d	39 d
Bohrdurchschnitt	43 m/d	50 m/d	81 m/d	78 m/d
Fördermenge	>85 l/s	>85 l/s	>85 l/s	>87 l/s
Fördertemperatur	86 °C	87 °C	>93 °C	>84 °C

ET – Endteufe; MD – Measured Depth; TVD – Total Vertical Depth

erfolgreich zur Umsetzung gekommen. Nachdem im Jahr 2008 bereits die erste geothermische Dublette abgebohrt und energetisch zur Fernwärmebereitstellung genutzt werden konnte, wurde das Projekt im Jahr 2014 mit zwei weiteren Bohrungen zur deutschlandweit ersten hydrothermalen Doppeldublette mit einer Gesamtleistung von über 20 MW(th) erweitert.

Ein kurzer Abriss der Projektchronologie findet sich in der Tabelle 1.

Erstmalig für ein Geothermieprojekt in Süddeutschland wurde bereits im Jahr 2005 eine neue, standortspezifische 2D-Neuseismik durchgeführt. Die Investitionen bei der Exploration zahlten sich für das Projekt aus: mit über 86 °C und einer Fördermengen von über 85 l/s konnten die im Jahr 2008/2009 niedergebrachten Bohrungen bereits im Winter 2009 in Betrieb gehen.

Aufgrund der stetig steigenden Zahl von Kunden und dem Hinzugewinn gewerblicher Großabnehmer wurde bereits ca. ein Jahr nach Fertigstellung der ersten Dublette mit den Vorplanungen für eine weitere Dublette (Th3/Th4) begonnen. Zunächst wurde das auf Basis der beiden ersten Bohrungen und der damaligen Seismikkampagne bereits vorhandene geologische Modell durch

drei weitere, speziell auf die Bohrungen Th3/Th4 abgestimmte Seismikprofile angepasst. Zum einen diente dies der Minimierung des Fündigkeitsrisikos (so konnten z. B. hochproduktive, verkarstete Zielgebiete mit mächtiger Massenkalkfazies auskartiert werden), zum anderen konnte dadurch das bohrtechnische Risiko, das sich z. B. durch ein unplanmäßiges Anfahren einer Störungszone in den Schichten oberhalb des Reservoirs ergeben kann, reduziert werden. Beide Bohrungen wurden mit hohen Neigungen im Malm von >60° und damit verbundenen langen Reservoiraufschlüssen von jeweils ca. 1.250 m fündigkeitsoptimiert geplant. Hohe Fündigkeiten beider Bohrungen führten in der Projektumsetzung jedoch glücklicherweise dazu, dass die angepeilten Filterstrecken nicht voll abgebohrt werden mussten, sondern die Bohrarbeiten bereits nach 615 m im Reservoir, im Fall der Reinjektionsbohrung Th3 sogar bereits nach 167 m beendet werden konnten. Die Geometrien der beiden Bohrungen wurden zudem im Vorfeld mittels einer hydraulisch-thermischen Simulation räumlich optimiert geplant, so dass gegenseitige negative Wechselwirkungen der Doppeldublette vermieden und positive Wechselwirkungen (z. B. gegenseitige hydraulische Potenzialstütze) ausgenutzt werden konnten.

Für die Bohrplanung konnte auf die bohrtechnischen Auswertungen der Bohrungen Unterföhring Th1 und Th2 sowie die Bohrungen in unmittelbarer Nähe (Ismaning, Aschheim) zurückgegriffen werden. Durch die Umsetzung dieser »Lessons Learnt« und dem konsequenten Einsatz von RSS-Systemen zusammen mit einer intensiven bohrtechnischen Vor-Ort-Betreuung mit einer kontinuierlichen Analyse der Bohrprozesse konnte die Bohrperformance in den Erweiterungsbohrungen signifikant gesteigert werden. Wurden für die Bohrungen Th1/Th2 noch durchschnittlich ca. 40–50 m am Tag gebohrt, so konnten in den neuen Bohrun-

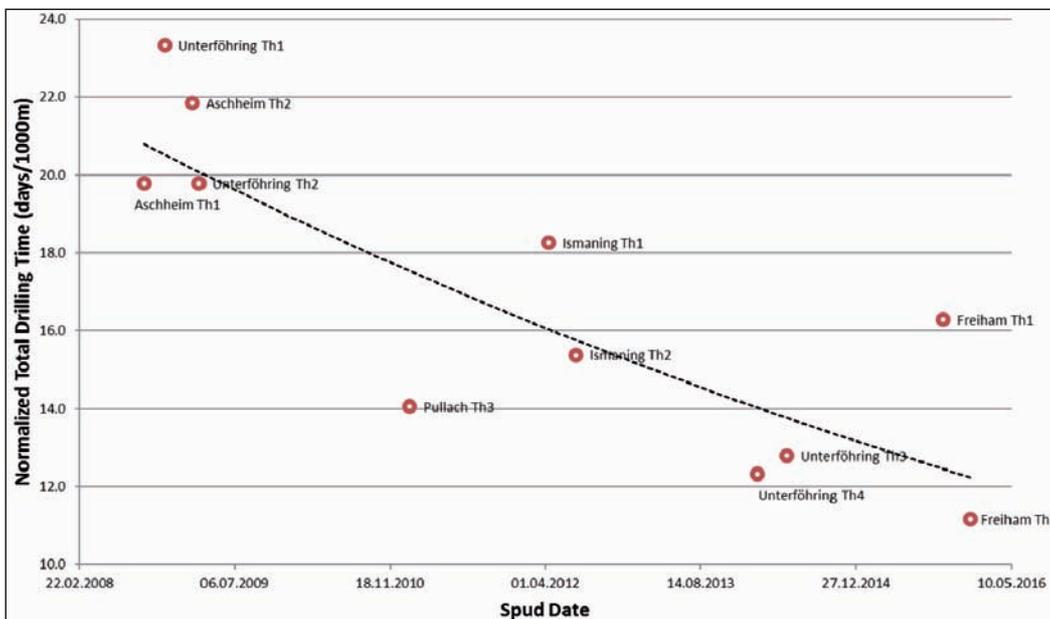


Abb. 9 Lernkurve der Bohrungen Unterföhring und Umgebung

gen Th4 und Th3 im Mittel ca. 80 m/d erzielt werden (Tabelle 2).

Die Bohrzeit der ersten Bohrung Th4 betrug von Bohrbeginn bis Erreichen der Endteufe bei 3.897 m MD lediglich 48 Tage. Nach eingehender Evaluierung der Bohrprozesse und Analyse der Bohrparameter der Bohrung Unterföhring Th4 konnte die Bohrzeit der anschließenden Bohrung Th3 nochmals gesteigert werden und die Endteufe bei 3.050 m MD wurde nach nur 39 Bohrtagen erreicht.

Der Erfolg des kontinuierlichen Optimierungsprozesses spiegelt sich direkt in der Bohrzeit und indirekt in den Bohrkosten wieder. Bei der in Abbildung 9 dargestellten Lernkurve werden vergleichbare Bohrungen zeitlich aneinandergereiht und ihr zeitlicher und finanzieller Aufwand gegenübergestellt. Der abnehmende Trend bei den normierten Bohrzeiten mit chronologischem Fortschritt der Bohrungen verdeutlicht dabei die nachhaltigen Optimierungsprozesse. Im Vergleich zu früheren Geothermieprojekten konnten entsprechend auch die Bohrkosten auf einen neuen Tiefstand gesenkt werden. Lag der durchschnittliche Bohrmeterpreis bei der ersten Dublette in Unterföhring noch bei etwa 1.400 Euro/m, so betrug er bei den Bohrungen Unterföhring Th3/Th4 ca. 1.100 Euro/m. Darin nicht enthalten sind die Kosten für Testarbeiten und Bohrplatzbau, da hier nur schwer eine Vergleichbarkeit verschiedener Projekte herzustellen ist. Bei Betrachtung von 20 Geothermiebohrungen im Großraum München liegt ein vergleichbar niedriger Bohrmeterpreis mittlerweile über zehn Jahre zurück [7].

#### Quellen

- [1] Dorsch, K.: 10 Jahre geothermische Exploration im süddeutschen Molassebecken – Ein Fazit, Geothermie in Bayern, S. 28–32, 2012.
- [2] Stadtwerke München GmbH (Hrsg.): Energiegewinnung der Zukunft: Geothermie-Anlage Sauerlach, Projektstand: Sommer 2010. Download unter <https://www.swm.de/dam/swm/dokumente/unternehmen/energieerzeugung/geothermie/geothermie-hkw-sauerlach.pdf> am 15. 11. 2016.
- [3] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft (Hrsg.): Bayerischer Geothermieatlas, 2012.
- [4] Stadtwerke München GmbH (Hrsg.), 2016: 3D-Seismik-Messungen in München abgeschlossen, Pressemitteilung vom 31. 03. 2016.
- [5] Steiner, U., Savvatis, A., Böhm, F., Schubert, A.: Explorationsstrategie tiefer geothermischer Ressourcen am Beispiel des süddeutschen Oberjuras (Malm). M. Bauer et al. (Hrsg.), Handbuch Tiefe Geothermie, pp. 421–461, 2014.
- [6] Böhm, F.: Die Lithofazies des Oberjura (Malm) im Großraum München und deren Einfluss auf die tiefergeothermische Nutzung. Dissertation an der Freien Universität Berlin, 2012.
- [7] Lentsch, D., Böhm, F., Dorsch, K., Schubert, A.: Performance Drilling am Beispiel des kommunalen Geothermieprojekts Unterföhring, bbr-Sonderheft Geothermie, S. 96–101, 2015.
- [8] Lentsch, D., Schubert, A.: Budgeting and risk assessment for deep geothermal wells, OIL GAS European Magazine 1/2014, S. 40–42.