

Bohrtechnische Fortschritte und Entwicklungen für geothermische Tiefbohrungen im Raum München - Rückblick, aktueller Stand und Ausblick

David Lentsch, Christoph Niederseer, Daniel Lackner, Manuel Fasching, Toni Ledig, Artjom Baydin und Maximilian Minihold
Stadtwerke München

Keywords: Tiefbohrung, Süddeutsches Molassebecken, Bohrtechnik, Geothermiebohrung, Multilateralbohrung, Multilateralerschließung, Futterrohrauslegung, Extended Reach Drilling, Rotary Steerable System, Bohren im urbanen Raum

1. Zusammenfassung

Im süddeutschen Molassebecken wurden in den letzten 25 Jahren ca. 60 Bohrungen zur rein energetischen Nutzung niedergebracht. Die Hälfte dieser Bohrungen wurde bereits vor 2009 abgeteuft, was insbesondere auf die hohe Bohraktivität in den Jahren 2008 und 2009 zurückzuführen ist, in denen allein 20 Bohrungen erfolgreich fertiggestellt wurden. In dieser frühen Phase intensiver Bohraktivität gab es jedoch auch Herausforderungen, beispielsweise war die Bohrleistung sehr unregelmäßig und bei einigen Bohrungen wurden im späteren Betrieb Schäden festgestellt.

Dennoch erwies sich diese Zeit als äußerst lehrreich. Durch die sorgfältige Analyse und Auswertung der gesammelten Daten konnten wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden, die in den Folgejahren zu erheblichen Verbesserungen führten.

Eine der wichtigsten Entwicklungen war die kontinuierliche Optimierung des Bohrprozesses. Durch den Einsatz modernster Bohrwerkzeuge und die Optimierung der Bohrparameter konnte der Bohrprozess erheblich beschleunigt und das Bohrrisiko reduziert werden. Darüber hinaus wurden umfangreiche Maßnahmen zur Vermeidung von kollabierenden Rohren durch Aufheizung oder Druckabsenkung getroffen. Ein weiterer Meilenstein war die Einführung der Multilateralerschließung. Mit dieser Methode können mehrere Bohrungen von einer Stammbohrung abgezweigt werden, was zu einer besseren Anbindung der Lagerstätte und zu einer höheren Produktivität führt.

Eine wesentliche zukünftige Innovation im Raum München wird vor allem eine deutliche Erhöhung der Reichweite von Bohrungen durch den Einsatz der sogenannten „Extended Reach Drilling“-Technologie sein. Da im innerstädtischen Bereich nur begrenzt Platz für Bohrstandorte zur Verfügung steht, wird es in Zukunft notwendig sein, den Erschließungsradius auf diese Weise zu vergrößern.

2. Einleitung

Die Nutzung des Malm-Aquifers begann bereits vor Jahrzehnten mit der Nutzung von Wasser für Thermalbäder (z.B. Bad Füssing und Bad Birnbach, Nathan 1949, 51-55; Erding, Gabauer 2000). Die ersten, vorrangig auf energetische Nutzung hin ausgerichteten Bohrungen wurden 1990 und 1992 in Straubing abgeteuft (BVG 2023; ITG 2023).

Die Exploration für die rein energetische Nutzung begann um die Jahrtausendwende. Dazu gehören die Projekte Erding (1998, siehe Gabauer 2000), Simbach-Braunau (1999, siehe GBS 2023), Unterschleißheim (2002, siehe BVG 2023), sowie Riem (2003, Höferle und Rühle 2005; Schubert 2004; Schubert et al. 2005), das erste Projekt der Stadtwerke München (SWM). Diese Bohrungen liegen alle im Bereich des Molassebeckens, in denen das Malm-Reservoir in geringeren Teufen angetroffen wird. Das Projekt Erding nahm 1998 eine bereits 1983 abgeteufte Erdölexplorationsbohrung in Betrieb, in der statt Erdöl Thermalwasser aufgeschlossen wurde. Um die Produktionsrate zu erhöhen, wurde das Projekt 2008 um eine Reinjektionsbohrung erweitert.

In den Gemeinden Unterhaching (2004 – 2007, Wolfgramm et al. 2007) und Pullach (2005, Baasch und Höferle 2005; Böhm 2012, S. 10–15; Schubert et al. 2005) wurde erstmals südlich des Stadtgebiets München gebohrt, was mit größeren Bohrtiefen einherging. Mit dem Projekt Unterhaching wurde zudem das erste Projekt zur Stromgewinnung realisiert.

Ab 2008 setzte eine starke Wachstumsphase der geothermischen Bohrprojekte in Bayern ein. Gründe für diese Entwicklung waren die Veröffentlichung des „Bayerischen Geothermie-Atlas“ (StMWIVT 2019), einer umfassenden Studie, die das Potenzial des Malm-Aquifers für die geothermische Nutzung darstellt, die Erhöhung der Vergütung für geothermische Stromerzeugung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz und die Einführung von Marktanreizen, die Zuschüsse und günstige Kredite für geothermische Heizwerke boten. (Dorsch und Pletl 2012)

In den Jahren 2008 und 2009 wurden insgesamt 19 Bohrungen an den Standorten Dürrnhaar, Aschheim, Kirchstockach, Sauerlach (Pletl et al. 2010), Garching, Mauerstetten (Tondera et al.), Poing, Altdorf, Oberhaching und Unterföhring fertig gestellt (BVG 2023; ITG 2023; Pletl et al. 2010; Schubert und Dorsch 2009). Mit den Bohrungen in Sauerlach, Dürrnhaar und Mauerstetten wurde auch der südliche, sehr tiefe Bereich des Beckens exploriert. Die Bohrung Sauerlach Th3b erreichte eine Rekordtiefe von 4.480 m TVD und 5.567 m MD.

In den Folgejahren nahm die Bohraktivität wieder ab und verlagerte sich teilweise in die Ostmolasse. An den Standorten Waldkraiburg (2010 - 2011), Kirchweidach (2011) und Traunreut (2012 - 2013) wurden nach Simbach-Braunau sechs weitere Bohrungen in der Ostmolasse abgeteuft (ITG 2023). Eine Bohrung in Traunreut erreichte dabei eine Länge von 5.413 m MD und eine Rekordtiefe von 4.582 m TVD. Im Großraum München wurden in diesem Zeitraum Bohrungen an den Standorten Taufkirchen (2011 – 2012, GWO 2023) und Ismaning (2012, ITG 2023) abgeteuft. In Ismaning wurde mit einer horizontalen Distanz von 3.120 m zwischen Bohransatz- und Bohrlandepunkt ein bis heute ungebrochener Reichweitenrekord aufgestellt (Lentsch et al. 2015a, S. 98).

2013 wurde im Südwesten des Beckens mit der Bohrung Geretsried (4.852 m TVD, 6.036 m MD) ein neuer Tiefenrekord aufgestellt. Die Bohrung war zwar bohrtechnisch erfolgreich, aber nicht fruchtig. (ITG 2023)

Zwischen 2014 und 2017 war ein Tiefpunkt der Bohraktivitäten zu verzeichnen. Im Jahr 2014 wurde lediglich das Projekt Unterföhring um zwei Bohrungen erweitert (Lentsch et al. 2015a). Es folgten je zwei Bohrungen in Freiham (2015 - 2016) und Holzkirchen (2016 - 2017, Dorsch et al. 2021) sowie eine nichtfruchtige Bohrung in Weilheim (2017, ITG 2023). Im Projekt Holzkirchen wurde der Tiefenrekord mit 5.050 m TVD und 6.084 m MD erneut übertroffen (Dorsch et al. 2021).

Von 2018 bis 2020 wurden sechs Bohrungen am innerstädtischen Standort Schäftlarnstraße in München abgeteuft. Im Zuge dieses Projektes wurde auch die erste Multilateralerschließung durchgeführt. (Lentsch 2022; Lentsch und Schweingruber 2022)

2021 wurde in Kirchanschöring eine nichtfündige Bohrung abgeteuft. Im Jahr 2022 gab es keine Bohraktivitäten und im Jahr 2023 wird voraussichtlich eine Bohrung am Standort Waldweihnacht fertiggestellt (BVG 2023). Die Aktivität in den letzten Jahren nahm also im Vergleich zu den Vorjahren deutlich ab.

Insgesamt wurden bisher an 29 Standorten Geothermieprojekte zur rein energetischen Nutzung realisiert (siehe Abb. 1 und Abb. 2, Stand August 2023), davon 15 in Betrieb genommene Fernwärmeprojekte (35 Bohrungen) und neun in Betrieb genommene Strom- bzw. Kraft-Wärme-Kopplungsprojekte (19 Bohrungen). Fünf Projekte (mit fünf Bohrungen) waren aufgrund geringer Fündigkeit nicht erfolgreich. Dazu gehören Mauerstetten (2009), Geretsried (2013), Weilheim (2017), Höhenrain (2018) und Kirchanschöring (2021). Am Standort Altdorf wurden zwei fündige Bohrungen abgeteuft, die jedoch noch nicht in Betrieb genommen wurden.

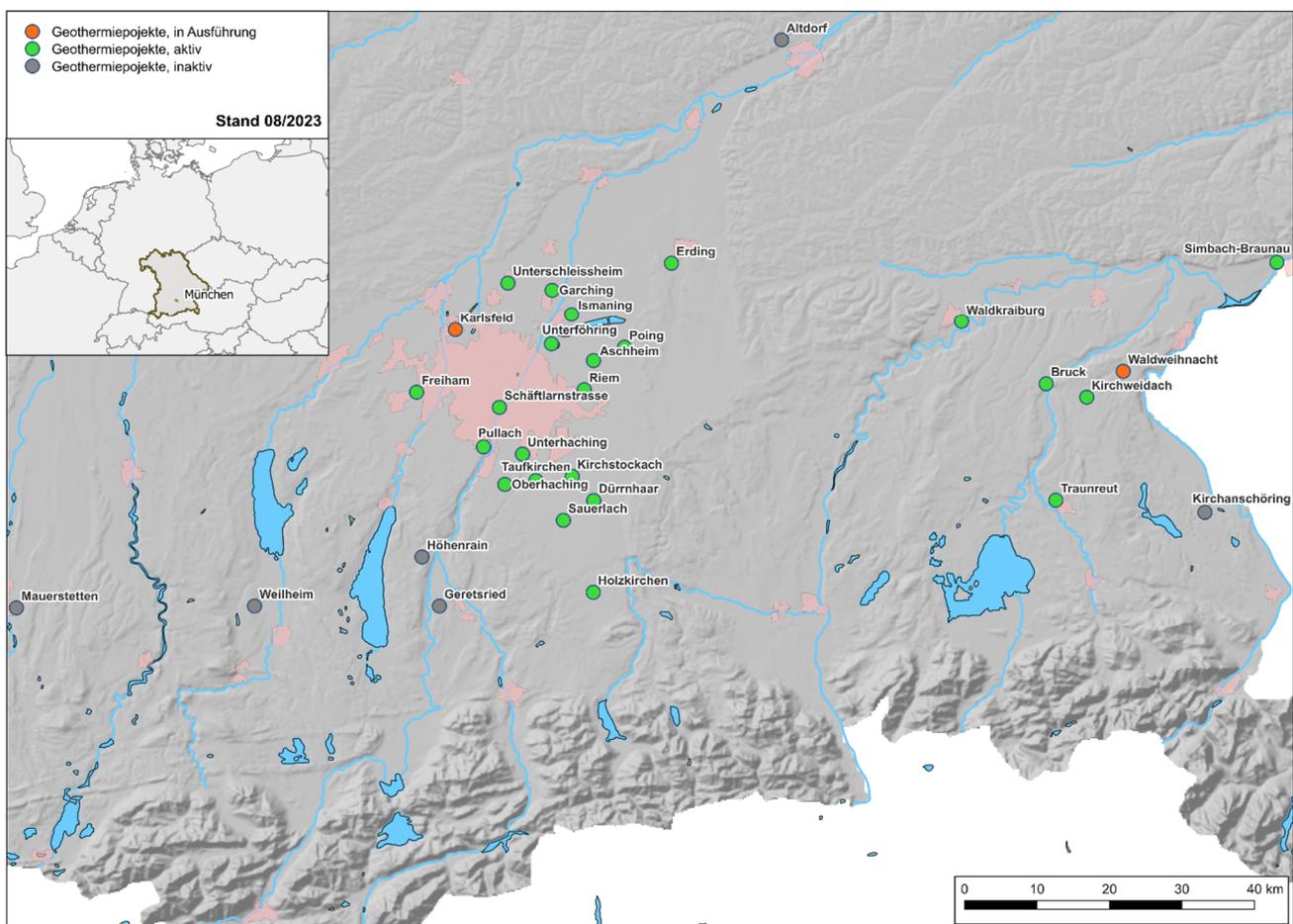


Abb. 1: Projektstandorte von Tiefengeothermiebohrungen im süddeutschen Molassebecken.

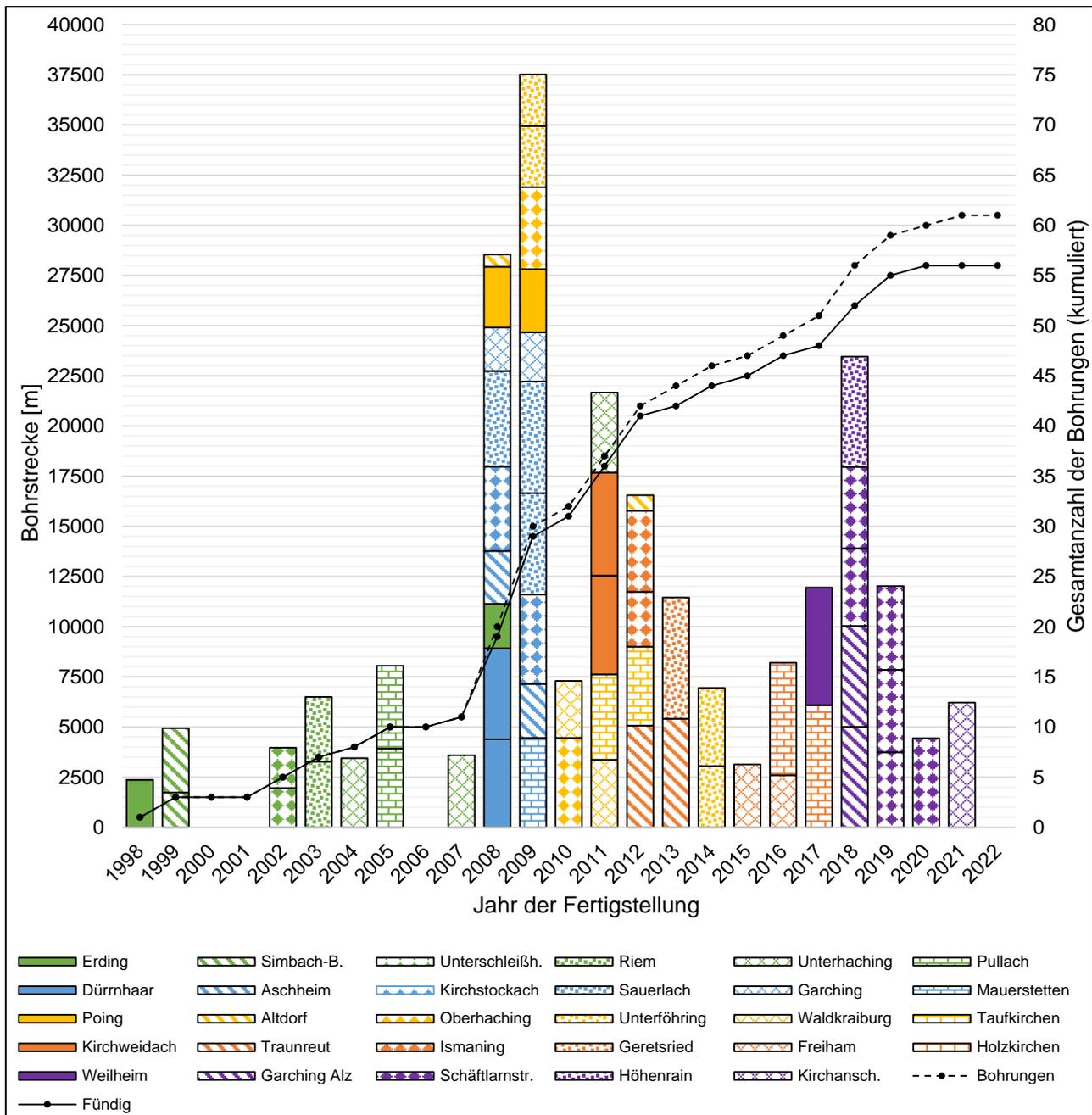


Abb. 2: Fertig gestellte Bohrungen für Tiefengeothermieprojekte im süddeutschen Molassebecken zwischen 1998 und 2022.

3. Bohrprozessoptimierung

Die bohrtechnische Planung erfuhr im Laufe der Zeit und besonders nach dem Höhepunkt der Bohraktivitäten in den Jahren 2008 und 2009 bei den SWM und einigen anderen Betreibern eine deutliche Neuausrichtung. Hierbei lag ein besonderer Fokus auf der Entwicklung von Strategien für schnelles, kostengünstiges und gleichzeitig risikominimiertes Bohren. (Lentsch et al. 2015a; Lentsch und Schubert 2013)

Mit der zunehmenden Zahl von Bohrungen stand auch eine immer größere Menge an Datenmaterial zur Verfügung. Spätestens ab 2009 konnte damit eine umfassende bohrtechnische Datenanalyse durchgeführt werden. Ein Hauptziel dieser Analyse war es, die immer noch recht große Varianz in der Bohrperformance zu verringern und den gesamten Bohrprozess im Durchschnitt effizienter zu gestalten.

Folgende Aspekte und Anforderungen haben sich dabei als wesentlich erwiesen:

- 1) Ein solides geologisches Modell, welches als Basis für sämtliche technische Planungsschritte dient: Ein gut ausgearbeitetes geologisches Modell bildet die Grundlage für sämtliche weitere Schritte der bohrtechnischen Planung. Das Verständnis der geologischen Parameter des Reservoirs und der darüberliegenden Schichten sowie die Identifizierung von potenziell problematischen Bereichen sind unverzichtbar für eine erfolgreiche und risikominimierte Planung. In dieser Hinsicht haben fortschrittliche 3D-Seismiken eine deutlich verbesserte Datengrundlage geschaffen. (vgl. Schulz et al. 2017, S. 75–76)
- 2) Eine umfassende technische Analyse vorheriger Bohrprojekte, um von deren Erfahrungen zu lernen: Um eine bestmögliche Bohrplanung nach den neuesten Standards zu ermöglichen, ist die Bewertung und Analyse von vergleichbaren Referenzbohrungen in der näheren Umgebung unabdingbar. Dieser Ansatz ermöglicht den Erfahrungsaustausch, minimiert bohrtechnische Probleme und optimiert den Fortschritt. Die gewonnenen Daten und Erkenntnisse aus jeder vorherigen Bohrung sollten zeitnah analysiert und in die Planung der nächsten Bohrung einfließen.
- 3) Eine gründliche Risikobewertung samt geeigneter Maßnahmen zur Minimierung dieser Risiken: Die Reduzierung der Gesamtarbeitsdauer erfordert nicht nur eine effiziente Durchführung des Bohrprozesses, sondern auch aller begleitenden Arbeiten wie dem Einbau von Rohren, der Zementation usw. Dabei spielt die Minimierung der bohrtechnischen Risiken eine zentrale Rolle, da die Behebung von unerwarteten Zwischenfällen oft mehr Zeit beansprucht als der eigentliche Bohrprozess. Die Risikobewertung erfolgt durch die Identifikation von geologischen Problemzonen entlang des Bohrpfads. Anschließend werden für diese Zonen bohrtechnische Hazard-Szenarien entwickelt, wobei die Eintrittswahrscheinlichkeit und das mögliche Schadensausmaß quantifiziert werden. Die Kombination dieser Faktoren bestimmt, ob das Risiko akzeptabel oder inakzeptabel ist. Für inakzeptable Risiken werden geeignete Maßnahmen ergriffen, um entweder die Eintrittswahrscheinlichkeit oder das Schadensausmaß zu reduzieren. Diese Maßnahmen können technischer oder organisatorischer Natur sein und fließen in die weitere Planung und letztendlich in die Durchführung ein.
- 4) Eine auf Bohrperformance ausgerichtete technische Planung: Parallel zur Risikoreduzierung liegt bei der bohrtechnischen Planung ein besonderes Augenmerk auf der Erzielung des maximalen Bohrfortschritts und einer nahtlosen Durchführung aller begleitenden Arbeiten. Sowohl das eingesetzte Equipment als auch die Bohrparameter spielen eine entscheidende Rolle für den Erfolg.
- 5) Eine umfassende und detaillierte Vorbereitung der bevorstehenden Bohrarbeiten: Eine intensive Vorbereitung der bevorstehenden Bohrarbeiten ist ein weiterer Schlüsselaspekt. In enger Abstimmung mit dem Bohrunternehmer und den Serviceunternehmen müssen klare Performance-Ziele definiert und sämtliche Parameter sorgfältig abgestimmt werden.
- 6) Eine intensive geologische und technische Überwachung direkt vor Ort: Schließlich ist eine intensive geologische und technische Betreuung vor Ort entscheidend für den Erfolg.

Ein wesentliches Ergebnis aus der Evaluierung und Optimierung war die Implementierung von Rotary Steerable Systemen (RSS) welche mittlerweile eine breite Anwendung gefunden haben und zu signifikanten Verbesserungen der Bohrperformance geführt haben. Die RSS-Technologie ermöglicht präzise Richtungsänderungen unter kontinuierlicher Rotation des Bohrstrangs.

Dies führte insbesondere in stark abgelenkten Bohrungen wie den meisten tiefen Geothermiebohrungen im Münchner Umland zur Minimierung der Probleme, die bei Anwendung der herkömmlichen Richtbohrsystemen, zu Verzögerungen und zu Kostensteigerungen führten. Die Erfahrungen zeigten auch, dass RSS den Verschleiß reduzierte und zu einem gleichmäßigen Bohrfad führte, was den Rohreinbau und die Zementation erleichterten. (Lentsch et al. 2012; Lentsch et al. 2015a)

Mit all diesen Maßnahmen konnte der Bohrfortschritt erheblich gesteigert werden. Bei SWM-Bohrungen mit 8 ½“ Enddurchmesser konnte die Bohrperformance, von durchschnittlich 31 Tage/1000 m in den Jahren 2008 bis 2009 auf 18 Tage/1000 m in den Jahren 2015 bis 2020, gesteigert werden (Abbildung 3). Auch die Varianz sank dabei erheblich: Die Differenz zwischen bester und schlechtester Performance konnte von 30 Tage/1000 m (Max. = 50, Min. = 20) auf 13 Tage/1000 m (Max. = 27, Min. = 14) gesenkt werden.

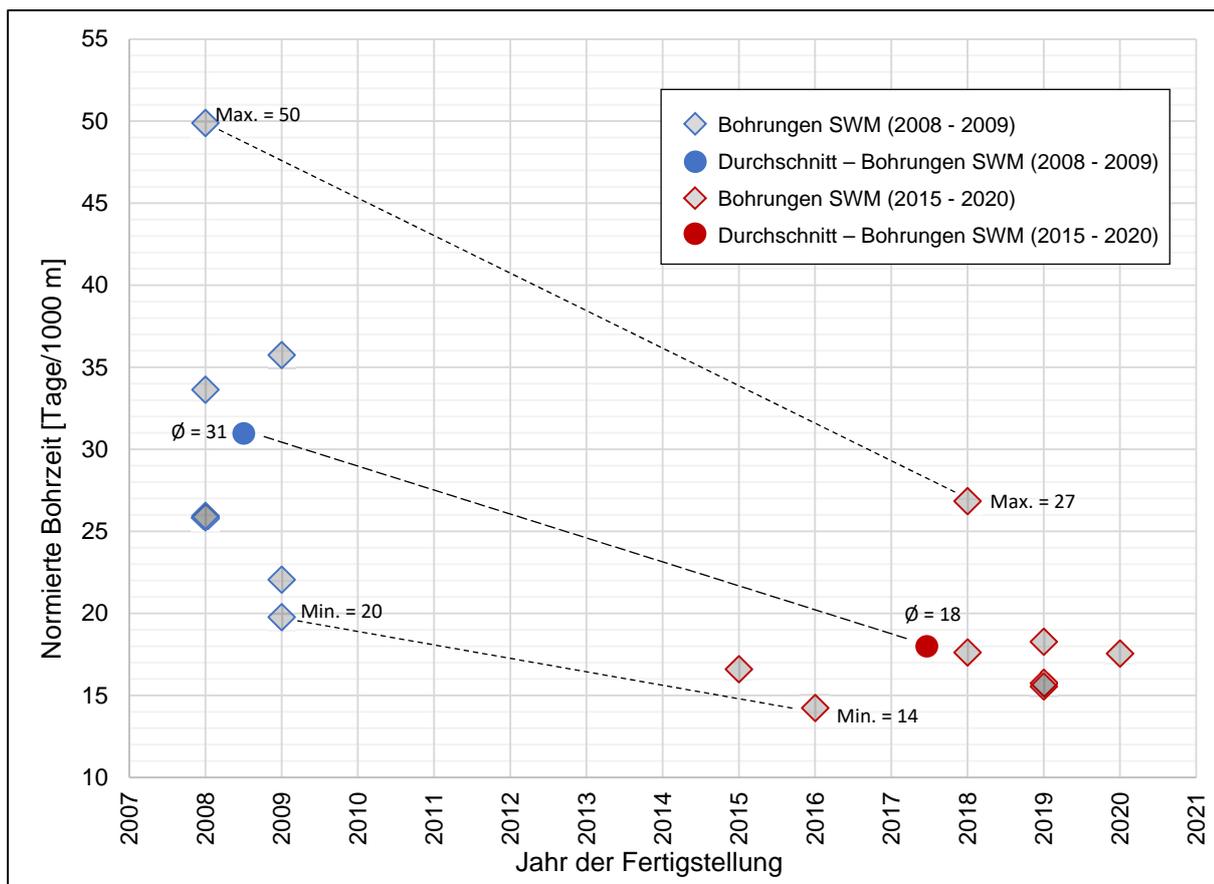


Abb. 3: Bohrperformance von SWM-Bohrungen mit 8 ½“ Enddurchmesser (2008 - 2009: Sauerlach, Kirchstockach und Dürrnhaar; 2015 - 2020: Freiham und Schäftlarnstraße)

4. Optimierung der Futterrohrauslegung

Neben der Bohrperformance wurde auch das Bohrungsdesign optimiert. Schäden an Futterrohren traten vor allem nach Aufheizung der Bohrung und Absenkung des Wasserspiegels während der Fördertests auf. Besonders häufig waren Rohrkollapse zu beobachten. Die Ursachen dafür sind Ringraumdruckerhöhung durch Aufheizung eingeschlossener Flüssigkeitstaschen (Annular Pressure Build-up, APB), Porenüberdruck und bzw. in Kombination mit Wandstärkenverlust durch Casingabrieb. (Lentsch et al. 2015b)

Nachdem diese Schäden erkannt worden waren, wurden Maßnahmen ergriffen, um solche Probleme in Zukunft zu vermeiden: Eine wesentliche Maßnahme war die Erhöhung der Sicherheitsfaktoren bei der Auslegung der Rohrtouren. In Deutschland gibt es diesbezüglich derzeit keine dezidierten Vorgaben für Geothermiebohrungen, lediglich für Öl- und Gasbohrungen, welche aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen andere Belastungsprofile und damit eine andere Bohrlochkonstruktion aufweisen. So ist der Sicherheitsfaktor in der Richtlinie zur Futterrohrauslegung des BVEG (Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V.) für das Szenario eines Kollapses beispielsweise lediglich 1,0 (BVEG 2006, S. 57).

Aus Ländern mit einer längeren Erfahrung in der Geothermie sind jedoch zusätzlich andere Standards verfügbar, wie z.B. der Standard für tiefe Geothermiebohrungen in Neuseeland (NZS 2015), welcher deutlich höhere Sicherheitsfaktoren vorsieht. In Tabelle 1 werden die Sicherheitsfaktoren der BVEG-Richtlinie und des NZS 2403 gegenübergestellt. Wenn möglich orientieren sich die SWM mittlerweile an den konservativeren Sicherheitsfaktoren des NZS. Ist dies nicht möglich oder nicht verhältnismäßig, wird zumindest ein möglichst hoher Sicherheitsfaktor gewählt. Als Minimum sind weiterhin Vorgaben der BVEG relevant, da diese in der Regel von den Genehmigungsbehörden als Industriestandard anerkannt werden.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Sicherheitsfaktoren nach der BVEG-Richtlinie zur Futterrohrauslegung und NZS 2404:2015.

		BVEG (2006)	NZS 2403: 2015
Pipe Body	Burst	1.1	1.5
	Collapse	1.0	1.2
	Axial Tension	1.25	1.8
	Axial Compression	1.1	1.4
	Triaxial	1.25	1.25
Connection	Burst	1.1	1.5
	Axial Tension < 13.3/8"	1.6	1.8
	Axial Tension ≥ 13.3/8"	1.8	1.8
	Axial Compression	1.1	1.4

Eine weitere Maßnahme zur Vermeidung von Rohrschäden ist die Verwendung von Non-Rotating Protectors während der Bohrarbeiten. Diese werden an den Bohrstrang montiert und verhindern einen Metall-Metall Kontakt zwischen Bohrgestänge und Futterrohren. Eine Erosion (Einschleifen) wird dadurch verhindert und die ursprüngliche Wandstärke der Futterrohre bleibt erhalten. Die Verwendung der Protectors ist vor allem im Bereich hoher Seitenkräfte notwendig. Diese treten hauptsächlich im Bereich von Bohrlochkrümmungen auf und hier im Besonderen im oberen Teil der Bohrung. (siehe auch (Lentsch et al. 2015b, S. 9))

Um Schäden durch Überdruckzonen vorzubeugen, wurde die Kollapsfestigkeit der Rohre durch Auswahl höherer Wandstärken und Stahlgüten erhöht. Auch die Porendruckprognose wurde

deutlich verbessert (vgl. Müller et al. 1988, S. 794 mit Drews et al. 2018, S. 47 und Dorsch et al. 2021, S. 9–11). Auf Grundlage aktuellerer Porendruckprognosen (Drews et al. 2018) und Anwendung höherer Sicherheitsfaktoren sind die Kollapsfestigkeiten deutlich erhöht worden. Dadurch konnten auch weitere Schäden an den Bohrungen verhindert werden.

Eine weitere Maßnahme Überdruckzonen zu begegnen ist das Einbauen einer weiteren Rohrtour. Diese dient dazu, die Hochdruckzonen im tieferen Tertiär (z.B. Rupel) mit den nachfolgenden Formationen der Kreide zu trennen und eine ausreichende Kick-Toleranz zu gewährleisten. (vgl. Dorsch et al. 2021; Lackner et al. 2018)

Schließlich wurden Maßnahmen zur Vermeidung von Annular Pressure Build-up umgesetzt. Dies beinhaltet zuallererst die Vermeidung von eingeschlossenen Flüssigkeitstaschen hinter den Rohren durch eine vollständige Zementation oder durch Gewährleistung der Kommunikation zwischen Ringraumflüssigkeiten und Übertage. Dabei wird z.B. statt einer Tagesrohtour ein vollständig zementierter Liner mit einem unzementierten Tieback kombiniert. Dadurch ist ein Druckaufbau im Ringraum hinter dem Tieback ausgeschlossen, da der Druck übertage kontrolliert und abgelassen werden kann.

Des Weiteren können punktuell auch Berstscheiben eingesetzt werden. Diese können z.B. unterhalb von Packern sinnvoll sein. Ist ein Flüssigkeitseinschluss zwischen Packer und Zementkopf vorhanden, kann der Druck über die Berstscheibe in das Bohrungsinere entweichen. Der Packer wird dann zwar als Barriere umgangen, der Druckaufbau kann allerdings nur stattfinden, wenn der Zement im Überlappungsbereich dicht ist. In diesem Fall ist die Umgehung des Packers akzeptabel und jedenfalls besser als ein Kollaps der Rohrtour. Sollte die Zementation im Überlappungsbereich nicht dicht sein entweicht der Druck in die Formation. Dabei bleibt die Berstscheibe intakt und der Packer dient weiterhin als zusätzliche Barriere. Auch die Kollapsfestigkeit der Rohrtouren kann erhöht werden, um einem Kollaps durch APB entgegenzuwirken. Allerdings sind die Drücke in der Regel so hoch, dass sie die maximal verfügbaren Kollapsfestigkeiten der Rohrtouren bei weitem übersteigen. (vgl. NZS 2015, S. 34; Lentsch et al. 2015b)

5. Multilateralschließung

Eine weitere wesentliche Weiterentwicklung war die Erschließung mittels Multilateralbohrung. Diese technische Möglichkeit wurde für Geothermiebohrungen im süddeutschen Molassebecken erstmals im Rahmen des Verbundvorhabens GEOMARE untersucht (Lentsch et al. 2021; Lentsch 2022; Lentsch und Schweingruber 2022; Pfrang et al. 2020).

Der Vorteil einer Erschließung mittels Multilateralbohrung ergibt sich zum einen durch einen größeren Drainageradius sowie der möglichen Anbindung von weiteren Reservoirbereichen. Des Weiteren werden durch die Aufteilung des Volumenstroms in zwei oder mehrere Äste die Reibungsdruckverluste vom Eintrittsbereich in die Bohrung entlang der Bohrung bis zur Abzweigstelle reduziert. Im Resultat führt dies entweder zu Pumpenstromereinsparungen bei gleicher Förderrate oder einer größeren Förderrate bei gleicher Absenkung. Die durchgeführte Studie zeigte, dass für einen großen Teil der Bohrungen eine Multilateralschließung wirtschaftlich sein kann. (Lentsch et al. 2021)

Auch die Bewertung der technischen Machbarkeit war positiv. Eine Analyse der in der Bohrindustrie üblichen Abzweigungstypen (nach TAML - Technology Advancement for Multi-Laterals) ergab, dass TAML Level 2 und Level 3 am besten für multilaterale Erschließungen im süddeutschen

Molassebecken geeignet sind. Wenn stabile lithologische Verhältnisse im Bereich der Abzweigung vorliegen, sollte bevorzugt der Typ Level 2 eingesetzt werden, während Typ Level 3 bei Instabilitäten geeigneter ist. Die möglichen Positionen für Abzweigungen sind allerdings auf den obersten Bereich des Reservoirs oder der darüberliegenden Barriereformation beschränkt. (Lentsch et al. 2021)

Im Jahr 2021 wurden die theoretischen Überlegungen um praktische Erkenntnisse aus einer zum ersten Mal im süddeutschen Molassebecken durchgeführten Multilateralbohrung ergänzt. Dazu wurde eine der sechs Bohrungen des Geothermieprojekts Schäftlarnstraße um einen Lateralast erweitert. Bei der Herstellung der Abzweigung gab es keine technischen Probleme und die Kosten blieben innerhalb des vorgesehenen Rahmens. Nach Absolvierung eines Drittels der geplanten Laterallänge mussten die Bohrarbeiten allerdings aufgrund von starker Verkarstung beendet werden. Dieses Problem tritt beim Bohren im Malm häufig auf und hat rein geologische Ursachen. Im Anschluss konnte der Ast erfolgreich getestet werden und die Stammbohrung problemlos wieder geöffnet werden. Obwohl der Ast nicht die volle Länge erreichte, betrug die Produktivitätssteigerung der multilateralen Testbohrung dennoch 16 % und führte in diesem Projekt zu einem positiven wirtschaftlichen Ergebnis. (Lentsch 2022, S. 85–108; Lentsch und Schweingruber 2022)

Nach diesem erfolgreichen Pilotprojekt planen die SWM für zukünftige Projekte Multilateralbohrungen als festen Bestandteil der Erschließungsstrategie. Ob eine Bohrung tatsächlich um einen Multilateralast erweitert wird, kann allerdings erst nach der Auswertung der Fördertests der Stammbohrung entschieden werden. Erst dann liegen alle Daten vor, um eine Wirtschaftlichkeits- und Risikoanalyse durchführen zu können. Die Designs der Stammbohrung werden allerdings bereits so geplant, dass möglichst gute Voraussetzungen für einen Multilateralast geschaffen werden (Abb. 4). Um die Produktivität zu maximieren, sollte der Abstand zwischen den Ästen maximiert werden. Daher wird bereits die Stammbohrung im Reservoir seitlich abgelenkt, um nach optionaler Durchführung des Seitenastes einen maximalen Abstand zu erreichen. Auch die Neigung wird bereits vor der Abzweigstelle stark erhöht, was ebenfalls eine Voraussetzung für eine große Distanz der zwei Äste im produktiven Reservoirbereich ist. Des Weiteren müssen bei Planung und Konstruktion der Stammbohrung stabile Bedingungen in der potenziellen Fensterteufe angestrebt werden. (Lentsch 2022, S. 116–117; Lentsch und Schweingruber 2022)

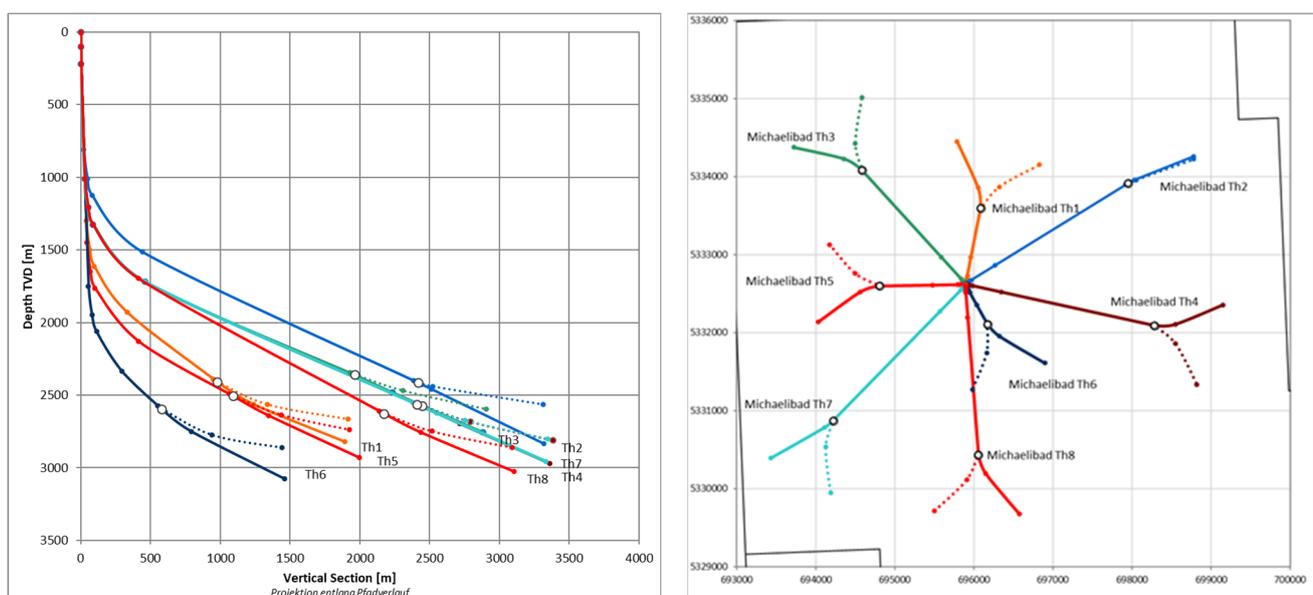


Abb. 4: Bohrfadplanung mit optionaler Multilateralerschließung (gepunktete Linie) im Projekt Michaelibad

6. Extended Reach Drilling

Um das gesamte Potenzial der Tiefengeothermie optimal nutzen und gleichzeitig die Anzahl der Bohrstandorte, die Erschließungskosten sowie die Umsetzungsdauer des geothermischen Ausbaupfads reduzieren zu können, ist es wichtig, dass einzelne Standorte eine hohe Produktionsrate erreichen. Eine naheliegende Maßnahme zur Erhöhung der Produktivität eines Bohrstandortes ist die Erhöhung des Erschließungsradius um einen Bohrplatz sowie die Anzahl der Bohrungen. Um dies zu ermöglichen, müssen allerdings die äußeren Bohrungen eine sehr große horizontale Distanz zwischen Bohransatzpunkt und Landepunkt zurücklegen (Extended Reach Drilling).

Der Ausdruck Extended Reach Drilling (ERD) stammt aus der Öl- und Gasindustrie und wurde ursprünglich für Bohrungen verwendet, bei denen das Verhältnis zwischen horizontaler Reichweite und vertikaler Tiefe (TVD) mindestens zwei beträgt. Im Laufe der Jahre hat sich der Begriff jedoch weiterentwickelt und umfasst nun auch Bohrungen mit einem Verhältnis von weniger als zwei (Hussain et al. 2021). Es geht dabei viel mehr um die Komplexität des Bohrpfades, die sich aufgrund der hohen Reichweite für bestimmte Tiefen ergibt. In Abbildung 5 wird daher nach Hussain et al. 2021 zwischen verschiedenen Schwierigkeitsstufen unterschieden (Low Reach, Medium Reach, Extended Reach und Extreme Reach).

Im Münchner Raum wurden bisher in flachen Tiefen (ca. 2.000 m Tiefe) horizontale Distanzen zwischen Bohransatzpunkt und -endpunkt von etwa 3.120 m erreicht (siehe Abbildung 2, Ismaning Th2, Lentsch et al. 2015a, S. 98). In größeren Tiefen (ca. 5.000 m Tiefe) wurden horizontale Distanzen von 2.400 m erreicht (siehe Abb. 5, Holzkirchen Th2b, Dorsch et al., 2021). Diese Bohrungen befinden sich schon im Grenzbereich zwischen „Medium Reach“ und „Extended Reach“.

In der Bohrindustrie weltweit wurden allerdings bereits wesentlich größere horizontale Distanzen realisiert (siehe Abb. 5: Industrielimit, Merlin 2023). Auf der Insel Sachalin (Russland) wurde bisher die längste horizontale Distanz von 14.129 m erreicht (Szymczak 2021). In Deutschland wurde durch Dieksand-Bohrungen (Oppermann 2012; vgl. Sudron et al. 1999) eine maximale horizontale Entfernung von 8.435 m erreicht (Dieksand 6, Husband et al. 2007, S. 6). Weitere bekannte Beispiele sind die Bohrungen im Wytch Farm Feld (vgl. z.B. Cocking et al. 1997) oder Offshore nahe der kalifornischen Küste (z.B. El Capitan SA-16; Armstrong und Evans 2011).

Das Potenzial zur Erhöhung der horizontalen Reichweite ist also noch sehr hoch. Die Stadtwerke München möchten daher im Rahmen eines Forschungsprojektes ein Konzept von mehreren exemplarischen Bohrungen in mehreren Tiefenlagen mit sehr großer Reichweite planen. Die maximale horizontale Entfernung zum Bohransatzpunkt wird dabei mindestens 6.000 m betragen. Dies würde in etwa einer Verdopplung der bisher maximal erreichten Reichweite bedeuten.

Bei dieser Planung steht die Modellierung der Lasten während der Bohrarbeiten und der Verrohrung im Fokus. Entscheidende Vorarbeiten diesbezüglich wurden bereits geleistet (Hillbrand et al. 2021). Zusätzlich werden unkonventionelle technische Maßnahmen notwendig. Zu diesen Techniken zählt vor allem der Einbau von Rohrtouren unter Auftrieb (Floating). Weitere technische Herausforderungen sind die Begrenzung der Bohranlagenkapazität, die Festigkeitsgrenzen des Bohrstranges, die Bohrlochstabilität, die Zementation, ein erhöhter Zirkulationsdruck und die Bohrlochreinigung.

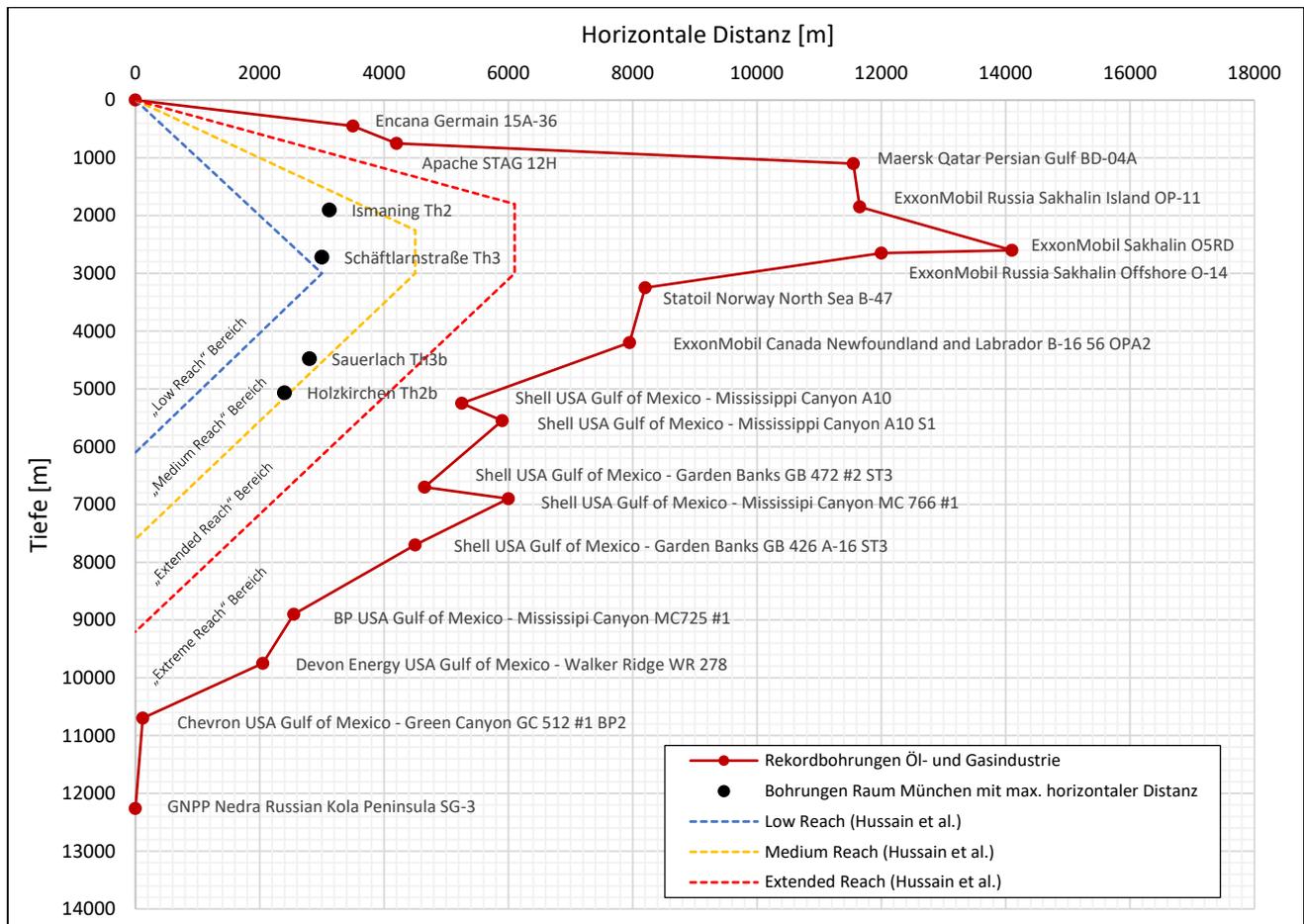


Abb. 5: Extended Reach Drilling „Nose-Plot“ mit Industrielimit (rot), Schwierigkeitsbereiche nach Hussain et al. (blau – gelb – rot strichliert) und Geothermiebohrungen im Raum München mit maximaler horizontaler Distanz (schwarz), Quelle: Merlin 2023

7. Bohren im urbanen Raum

Lärmvermeidung spielt bei innerstädtischen Bohrvorhaben eine besondere Rolle. Es gilt sowohl die rechtlichen Rahmenbedingungen einzuhalten als auch die allgemeine Emissionsvermeidung zu beachten, da insbesondere die öffentliche Akzeptanz für ein mehrjähriges urbanes Bohrvorhaben, von großer Bedeutung ist.

Die SWM beabsichtigen die Niederbringung von acht geothermalen Tiefbohrungen von einem Sammelbohrplatz im dicht bebauten urbanen Umfeld am Standort des Michaelibads in München. Während der Planungsarbeiten erfolgte die Ausarbeitung eines Lärmvermeidungskonzeptes mit dem Ziel durch Planung und Realisierung von technischen und organisatorischen Schallschutzmaßnahmen am Bohrplatz und der Bohranlage den Betrieb, inkl. aller Nebentätigkeiten, während jeder Tages- und Nachtzeit zu ermöglichen. Bestandteil des Lärmvermeidungskonzeptes ist eine vorangegangene Prozessanalyse, die planerische Lärmquellenvermeidung und die Minderung der Lärmemissionen durch verschiedene zu ergreifende Maßnahmen. Die Minderung der Lärmemissionen kann durch technische, organisatorische und

planungstechnische Maßnahmen erfolgen. Ein weiterer wichtiger Bestandteil der wirkungsvollen Lärmvermeidung ist die Schulung und Sensibilisierung der auf der Bohrlokation tätigen Personen.

Auf Grundlage eines eingehenden schallschutztechnischen Gutachtens wurden in Kooperation mit einem akkreditierten Gutachter für Akustik, Schall- und Erschütterungsschutz zu ergreifende technische Mindestmaßnahmen am Bohrplatz und der Bohranlage detailliert festgelegt. Unter anderem wurden bestimmte Parameter wie Schalldämm-Maß und Schallabsorptionsgrad vorgegeben, um einzusetzende Schallschutzelemente zu definieren.

Hinsichtlich der Lärmquellenvermeidung wurden emissionsreduzierter Substitute, wie z.B. vakuumunterstützte Schüttelsiebe für lärmkritische Elemente vorgegeben.

Für Aggregate in Container-Bauweise wie Transformatoren, Hydraulic Power Unit (HPU), Zentrifugen usw. sollten technische Schallschutzmaßnahmen in Form von Kapselungen vorgesehen werden.

Darüber hinaus wurden gezielte technische Mindestmaßnahmen für Sonderbetriebszustände wie Zementations-, Säuerungs- und Logging-Arbeiten ermittelt. Beispielsweise wurde eine U-förmige mobile Garage mit innenseitigem Schallschutz ausgekleidet. (Lackner et al. 2022)

8. Zusammenfassung

Die Exploration für die rein energetische Nutzung begann um die Jahrtausendwende mit einigen wenigen Projekten. Ab 2008 setzte aufgrund der Veröffentlichung des "Bayerischen Geothermie-Atlas" und Marktanreizprogrammen eine Wachstumsphase ein. Allein in den Jahren 2008 und 2009 wurden insgesamt 19 Bohrungen abgeteuft. Einige dieser Bohrungen erreichten erstmals sehr große Tiefen im südlichen Bereich des Beckens. Zu diesem Zeitpunkt wurde in einigen Projekten und auch bei den SWM die bohrtechnische Planung neu ausgerichtet, um schneller, kostengünstiger und risikominimiert zu bohren. Ein solides geologisches Modell, die Analyse vorheriger Bohrprojekte, eine intensive Vorbereitung der Bohrarbeiten und eine genaue Überwachung vor Ort sowie die Nutzung von Rotary Steerable Systemen führte zu signifikanten Verbesserungen der Bohrperformance.

In einigen Bohrungen, die bis zu diesem Zeitpunkt abgeteuft wurden, traten Schäden an Futterrohren auf, insbesondere durch Rohrkollaps. Die Ursachen dafür waren Annular Pressure Build-up, Porenüberdruck und Wandstärkenverlust durch Casingabrieb. Um solche Schäden zu vermeiden, wurden die Sicherheitsfaktoren und die Kollapsfestigkeit der Rohre erhöht, sowie Berstscheiben und Non-Rotating Protektoren verwendet. Ferner wurden Maßnahmen zur Vermeidung von eingeschlossenen Flüssigkeiten hinter den Futterrohren umgesetzt. Diese Maßnahmen trugen insgesamt dazu bei Schäden an den Bohrungen weitestgehend zu verhindern.

Um das Potenzial der Tiefengeothermie optimal nutzen zu können, planen die Stadtwerke München (SWM) im Rahmen eines Forschungsprojekts mehrere Bohrungen mit großer Reichweite. Die Bohrungen sollen dabei eine maximale horizontale Entfernung von mindestens 6.000 m erreichen.

Die SWM beabsichtigen zukünftig Bohrvorhaben im dicht bebauten innerstädtischen Bereich zu realisieren. Bei solchen Bohrvorhaben ist die Vermeidung von Lärm von großer Bedeutung. Ein Lärmvermeidungskonzept mit technischen und organisatorischen Maßnahmen wurde entwickelt, um den Betrieb rund um die Uhr zu ermöglichen. Es wurden detaillierte technische Mindestanforderungen für den Lärmschutz am Bohrplatz und der Bohranlage festgelegt.

Quellenangaben

- Armstrong, Neil R.; Evans, Andrew M. (2011): Extended Reach Drilling - Offshore California. Extending Capabilities and Improving Performance: All Days. SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. Amsterdam, The Netherlands, 01.03.2011 - 03.03.2011: SPE.
- Baasch, Ralph; Höferle, Renate (2005): Fernversorgung mit Geothermie - eine gute Investition in die Zukunft der Gemeinde Pullach. *Geothermische Energie*, S. 14–17. GtV Service GmbH - Bundesverband Geothermie.
- Böhm, Franz (2012): Die Lithofazies des Oberjura (Malm) im Großraum München und deren Einfluss auf die tiefengeothermische Nutzung. Dissertation. Freie Universität Berlin, Berlin.
- BVEG (2006): Leitfaden Futterrohrberechnung: BVEG, 2006.
- BVG (2023): Bundesverband Geothermie - Projektwebsites. Hg. v. Bundesverband Geothermie. Online verfügbar unter <https://www.geothermie.de/>.
- Cocking, D. A.; Bezant, P. N.; Tooms, P. J. (1997): Pushing the ERD Envelope at Wytch Farm: All Days. SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam, Netherlands, 04.03.1997 - 06.03.1997: SPE.
- Dorsch, Klaus; Lentsch, David; Niederseer, Christoph; Götz, Albert (2021): The Deep Hydrogeothermal Project in Holzkirchen, Molasse Basin, Germany: Proceedings. World Geothermal Congress 2020+1. World Geothermal Congress. Reykjavik Iceland, 2021-04 to 2021-10: International Geothermal Association.
- Dorsch, Klaus; Pletl, Christian (2012): Bayerisches Molassebecken - Erfolgsregion der Tiefengeothermie in Mitteleuropa. *Geothermische Energie*, S. 14–18.
- Drews, Michael C.; Bauer, Wolfgang; Caracciolo, Luca; Stollhofen, Harald (2018): Disequilibrium compaction overpressure in shales of the Bavarian Foreland Molasse Basin: Results and geographical distribution from velocity-based analyses. *Marine and Petroleum Geology*, S. 37–50.
- Gabauer, A. (2000): Geowärme für Erding - Das Projekt und seine Geschichte. *Geothermische Energie* 8, S. 1–6.
- GBS (2023): Projektwebsite Geothermieprojekt Simbach-Braunau. Hg. v. Geothermie-Wärmegesellschaft Braunau-Simbach mbH. Online verfügbar unter <https://www.geothermie-braunau-simbach.com/Das-Projekt/Die-Bohrung>.
- GWO (2023): Projektwebsite Bohrungen Taufkirchen. Hg. v. Gemeindewerke Oberhaching. Online verfügbar unter <https://www.gemeindewerke-oberhaching.de/aktuelles/geothermie-einfach-erklaert>.
- Hillbrand, Gudrun; Fasching, Manuel; Lentsch, David; Thonhauser, Gerhard (2021): Stuck Casing Mitigation, Raising Situation Awareness During Casing/Liner Installation Based on Real Time Friction Coefficient Analysis: Proceedings. World Geothermal Congress 2020+1. World Geothermal Congress. Reykjavik Iceland, 2021-04 to 2021-10, S. 1: International Geothermal Association.
- Höferle, Renate; Rühle, Werner (2005): Erdwärme für die Messestadt Riem. *Zeitung für kommunale Wirtschaft*.
- Husband, F. J.; Bitar, George; Quinlan, Mark (2007): Extended Reach: New Generation Frontier Drilling Rigs: All Days. Offshore Technology Conference. Houston, Texas, U.S.A, 30.04.2007 - 03.05.2007: OTC.
- Hussain, Sajjad; Dahroug, Mohamed Saher; Mikalsen, Belinda; Christensen, Karianne Holen; Nketah, Daniel Ndubuisi; Monterrosa, Leida et al. (2021): Enabling Technologies Help Drilling an

Extreme ERD Well on Brage Field, North Sea: Day 3 Wed, March 10, 2021. SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition. Virtual, 08.03.2021 - 12.03.2021: SPE.

ITG (2023): Informationsportal Tiefe Geothermie. Hg. v. Enerchange. Online verfügbar unter <https://www.tiefegeothermie.de/>.

Lackner, Daniel; Ledig, Toni; Betzl, Bernhard; Heitkämper, Wolfgang; Walter, Cord (2022): Urbanes Bohren - Entwicklung eines Lärmvermeidungskonzeptes zur erfolgreichen Realisierung von Bohrvorhaben im dichtbebauten urbanen Umfeld: European Geothermal Congress. European Geothermal Congress. Berlin, 2019-10-17: EGEC.

Lackner, Daniel; Lentsch, David; Dorsch, Klaus (2018): Germany's Deepest Hydro-Geothermal Doublets. Drilling Challenges and Conclusions for the Design of Future Wells: Transactions. GRC Annual Meeting. GRC Annual Meeting. Reno, Nevada, USA, 2018-10-14: Geothermal Resources Council.

Lentsch, David (2022): The Potential of Multilateral Wells for Geothermal Energy Recovery in the South German Molasse Basin. Dissertation. Montanuniversität Leoben, Leoben. Department of Petroleum Engineering, Chair of Petroleum and Geothermal Energy Recovery.

Lentsch, David; Böhm, Franz; Dorsch, Klaus; Schubert, Achim (2015a): "Performance Drilling" am Beispiel des kommunalen Geothermieprojekts Unterföhring. In: BBR (Hg.): Sonderheft Geothermie 2015. Bonn: wvgw Wirtschafts- und verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, S. 96–101.

Lentsch, David; Dorsch, Klaus; Sonnleitner, Natascha; Schubert, Achim (2015b): Prevention of Casing Failures in Ultra-Deep Geothermal Wells (Germany): Proceedings. World Geothermal Congress. World Geothermal Congress. Melbourne, Australia, 2015-04-19: International Geothermal Association.

Lentsch, David; Savvatis, Alexandros; Hofstätter, Herbert; Ganzer, Leonhard (2021): Potential of Multilateral Wells for Geothermal Projects in the Southern German Molasse Basin: Proceedings. World Geothermal Congress 2020+1. World Geothermal Congress. Reykjavik Iceland, 2021-04 to 2021-10: International Geothermal Association.

Lentsch, David; Savvatis, Alexandros; Schubert, Achim; Schoebel, Wolfgang (2012): Overcoming Drilling Challenges with Rotary Steerable Technology in Deep Geothermal Wells in the Molasse Basin of Southern Germany: Transactions. GRC Annual Meeting. GRC Annual Meeting. Reno, Nevada, USA, 2012-09-30: Geothermal Resources Council.

Lentsch, David; Schubert, Achim (2013): Risk Assessment for Geothermal Wells? A Probabilistic Approach to Time and Cost Estimation: Transactions. GRC Annual Meeting. GRC Annual Meeting. Las Vegas, Nevada, USA, 2013-10-15: Geothermal Resources Council.

Lentsch, David; Schweingruber, Mischa (2022): First Multilateral Deep Geothermal Well in the South German Molasse Basin: European Geothermal Congress. European Geothermal Congress. Berlin, 2019-10-17: EGEC.

Merlin (2023): Merlin ERD - Nose Plot. Hg. v. Merlin ERD. Online verfügbar unter <https://merlinerd.com/erd-nose-plot/>.

Müller, Manfred; Nieberding, Franz; Wanninger, Anton (1988): Tectonic style and pressure distribution at the northern margin of the Alps between Lake Constance and the River Inn. *Geologische Rundschau* 77, S. 787–796. Springer.

NZS (2015): Code of practice for deep geothermal wells. Standards New Zealand NZS 2403:2015.

Oppermann, H. (2012): Operation of Germany's Largest Oilfield Mittelplate and Planning Further Exploratory Drilling in UNESCO World Natural Heritage Site Enclaves: All Days. International

- Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production. Perth, Australia, 11.09.2012 - 13.09.2012: SPE.
- Pfrang, D.; Dirner, S.; Dorsch, K.; Bohnsack, D.; Beichel, K.; Feindt, O. et al. (2020): GEOmaRe-Ganzheitlich optimierte und nachhaltige Reservoirverschließung für tiefegeothermische Anlagen im bayerischen Molassebecken. *Geothermische Energie* 97, S. 20–21.
- Pletl, C.; Stoyke, R.; Toll, H. (2010): Bohrerfahrungen bei Sueddeutschlands größtem. *Geothermieprojekt bbr* 3, S. 38–47.
- Schubert, A. (2004): Geothermische Dublette Riem für die kommunale Fernwärmeversorgung der Stadtwerke München. *GTV Fachtagung, Tagungsband*, S. 187–196.
- Schubert, A.; Höferle, R.; Böhm, F. (2005): Geothermische Dubletten München Riem und Pullach i. Isartal im Vergleich, Geologische und bohrtechnische Konzepte zur Minimierung des geologischen Risikos im Malmtiefengrundwasserleiter. *GtV Tagungsband, Tagung, Unterschleißheim*.
- Schubert, Achim; Dorsch, Klaus (2009): Geothermieprojekte im Oberbayerischen Molassebecken (Zwischenstand und Ausblick). *Geothermie in Bayern*, S. 50–51.
- Schulz, Ilka; Steiner, Ulrich; Schubert, Achim (2017): Erfolgsfaktoren bei Projekten der Tiefengeothermie - Erfahrungen aus dem Bayerischen Molassebecken. Factors for the Success of Deep Geothermal Projects - Experience from the Bavarian Molasse Basin. *Erdöl Erdgas Kohle* 133, S. 73–79. EID Energie Informationsdienst GmbH.
- StMWIVT (2019): Bayerischer Geothermieatlas. Hydrothermale Energiegewinnung. Hg. v. Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie. Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie. Munich. Online verfügbar unter https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwi/Publikationen/2019/2019-03-19_Bayerischer_Geothermieatlas_2019.pdf, zuletzt geprüft am 05.01.2021.
- Sudron, Ken; Berners, Heinz; Frank, Ulrich; Sickinger, Werner; Hadow, Anthony; Klop, Govert (1999): Dieksand 2; an Extended Well Through Salt, Increases Production from an Environmentally Protected Field: All Days. SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam, Netherlands, 09.03.1999 - 11.03.1999: SPE.
- Szymczak, Pat Davis (2021): Extended-Reach Drilling Hits Mainstream To Squeeze Difficult Reservoirs. *Journal of Petroleum Technology* 73, S. 35–37.
- Tondera, Detlef; Klapperich, Herbert; Blöcher, Guido; Moeck, Inga; Steiger, Torsten; Bems, Curd; Hild, Stephan: Geothermie-Forschungsprojekt "Allgäu 2.0" - Forschungsansätze, Laboruntersuchungen & Planungsschritte. In: Tagungsband 19. Tagung für Ingenieurgeologie mit Forum für junge Ingenieurgeologen, S. 285–293.
- Wolfgramm, Markus; Bartels, Jörn; Hoffmann, F.; Kittl, G.; Lenz, G.; Seibt, P. et al. (Hg.) (2007): Unterhaching geothermal well doublet: structural and hydrodynamic reservoir characteristic; Bavaria (Germany): Citeseer (30).