

Iterative Bohrlochstabilitätsanalyse für geothermale Tiefbohrungen im bayerischen Molassebecken

Iterative Borehole Stability Analysis for Geothermal Deep Wellbores in the Bavarian Molasse Basin

Tobias Backers¹, Inga Moeck²

¹ Dr. Tobias Backers, geomecon GmbH, tobias.backers@geomecon.de

² Prof. Inga Moeck, Dep. Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta, moeck@ualberta.ca

Zusammenfassung

Einer der größten Posten notwendiger Investitionen für die Nutzung tiefliegender geothermischer Energiesysteme ist der Aufschluss der Lagerstätte. Eine Kostenoptimierung bei der Bohrerstellung wirkt sich direkt positiv auf den Verkaufspreis des Produktes Energie aus; somit muss das Augenmerk auf einer effizienten Bohrerstellung liegen, die über eine rein bohrtechnische Herangehensweise hinausgeht. Das Abteufen einer Tiefbohrung und die Veränderung der Druckbedingungen in der Lagerstätte führen zur Alteration der lokalen Spannungsbedingungen im Untergrund. Dies kann negative Auswirkungen auf die Erstellung der Bohrung oder Performance der Lagerstätte haben. Dieser Beitrag umreißt und diskutiert die wesentlichen Punkte eines optimierten, iterativen Arbeitsablaufes zur Optimierung der Bohrlochstabilitätsanalyse. Der vorgestellte integrierte Ansatz nutzt Methoden der Strukturgeologie, um das regionale und in-situ Spannungsfeld abzuschätzen und um Aussagen über die maßgeblichen Strukturdaten wie Rissdichten und Störungen zu gewinnen. Diese Erkenntnisse werden mittels klassischer und georissmechanischer Methoden für die Analyse der Bohrlochstabilität verwendet und berücksichtigen nicht nur die Festigkeit des Gesteins, sondern auch das in-situ Rissinventar und umliegende Störungen.

Schlüsselworte: Geothermalbohrung, Bohrlochstabilität, Spannungsfeld, Trennflächeninventar, Rissmechanik, Bohrfadoptimierung, numerische Modellierung

Abstract

The most extensive cost effects of deep geothermal projects appear along with drilling and accessing the reservoir. Reduction of this high initial investment would turn geothermal project more attractive to communities and investors. From this perspective, well path optimization goes beyond efficiency of drilling to reduce drilling time. Another cost effective part of boreholes is borehole stability which matters especially in regions with high horizontal differential stresses as the Bavarian Molasse Basin. Drilling into deep reservoirs is accompanied by stress perturbations at the borehole wall which are in direct relation to the local stress conditions. Exceed these stress redistributions the strength of rock wellbore failure occurs possibly causing delays in rate of penetration or lost of the well. To tackle this challenge, our project oriented approach combines structural geological analysis along with stress fields determination and numerical fracture mechanical simulation. The results of our fracture mechanical models help to optimize drilling operation like adaption of mud pressure to stresses along deviated wells in any stress regime and targeting the well into fault zones. With such an integrated fracture mechanical and structural geological approach well integrity and borehole stability can be realized with direct effects on drilling cost especially of geothermal wells drilled deviated and with larger diameters than hydrocarbon wells.

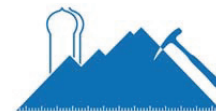
Keywords: Geothermal wells, borehole stability, stress field, fracture inventory, fracture mechanics, well path optimization, numerical simulation

1 Einleitung

Einer der größten Posten notwendiger Investitionen bei der Erschließung tiefliegender geothermischer Energiesysteme ist die Erstellung der Bohrung. Aufgrund der besonderen Eigenschaften des Energieträgers werden häufig großkalibrige Querschnitte geteuft. Ein weiteres Hauptaugenmerk liegt im sogenannten speicherschonenden Aufschluss der Lagerstätte. Hierbei wird mit möglichst geringem Spülmittelgewicht im Lagerstättenbereich gebohrt; idealerweise sind die Spülmittel drücke hierbei so eingestellt, dass keine Spülmittelzusätze in die Formation eindringen, also der Spü-

lungsdruck gleich oder sogar unter dem Lagerstättendruck liegt. Somit ist sichergestellt, dass ein etwaiger Massentransport aus der Formation heraus stattfindet.

Dieses Vorgehen birgt aber gewisse Risiken u.a. in Bezug auf die Stabilität der Bohrung. Je geringer der Spülmittel druck ist, desto höher sind die im bohrungsnahen Bereich wirkenden Spannungsumlagerungen. Je höher die wirkenden Spannungen sind, desto höher ist das Risiko von Bohrungsversagen. Bei sehr hohen Differentialspannungen, wie z.B. im Bayrischen Molassebecken, sind hier die Risiken für einen Bohrungskollaps mit massiven Nachfällen beson-



ders hoch. Ein kurzer Abriss zum Thema Bohrungsstabilität findet sich in Backers (2011). Bei massivem Nachfall in die Bohrung durch sogenannte Bohrlochrandausbrüche kann die Garnitur fest werden. Im positiven Fall sind durch die notwendig werdenden Fangarbeiten Zusatzkosten durch die Sonderarbeiten und Standzeiten der Anlage zu bilanzieren, im negativen Fall ist ein Teil der Bohrung abzuwerfen und neu als sogenannter ‚side-track‘ zu teufen.

Der vorliegende Beitrag stellt einen integrierten Arbeitsablauf vor, der über die klassischen bohrungsgeomechanischen Ansätze hinausgeht. Während bei den konventionellen Methoden i.W. nur eine Betrachtung von grob abgeschätztem Spannungsfeld und Gesteinsfestigkeit vorgenommen wird, erweitert der hier vorgestellte Arbeitsablauf die verwendete Datenbasis und Methodik um ein verbessertes Verständnis des regionalen und in-situ Spannungsfeldes und um Aussagen über die maßgeblichen Strukturdaten wie Rissdichten und Störungen. Das Spannungsfeld und das Rissinventar haben einen maßgeblichen Einfluss nicht nur auf das mechanische sondern auch das hydraulische Verhalten des Untergrundes (Quesada et al, 2008). Die möglichst genaue Bestimmung des Spannungsfeldes ist eine Grundvoraussetzung für jegliche geomechanische Betrachtung der Bohrungsstabilität und Planung des Bohrpfad. Die Berücksichtigung der Strukturdaten liefert zusätzliche Informationen für eine Optimierung des Bohrpfad und des notwendigen Spülgewichtes, da die Bohrungsorientierung unter Berücksichtigung der Spannungsfeldorientierung, des Spannungsregimes und der Orientierung des Rissnetzwerkes analysiert werden kann.

Der in diesem Beitrag umrissene Arbeitsablauf basiert auf einer struktureologisch-geomechanischen Datenerhebung, aus welcher das Struktur-, Spannungs- und Geomechanikmodell abgeleitet werden. Ausgehend von den Modellen wird eine Kombination aus klassischer bohrungsgeomechanischer Planung und rissmechanischer Simulation vorgeschlagen, welche insbesondere die Strukturdaten zur Optimierung des Spülingsplanes und Bohrpfad nutzt. Die

Ergebnisse hieraus bieten eine verbesserte Sicherheit gegen Bohrungsinstabilitäten.

Während des Bohrbetriebes werden dann laufend die während des Teufens gewonnenen Erkenntnisse zur Verbesserung der Modelle genutzt und die Planungsdaten aktualisiert und verfeinert. Darüber hinaus kann hierbei iterativ aus dem Erkenntnisgewinn im Zuge des Projektes die Auslegung und der Zielpunkt der zweiten Bohrung angepasst werden und die Kenngrößen des späteren Betriebes der Anlage in Bezug auf Förder- und Injektionsraten abgeschätzt werden.

2 Arbeitsablauf

Die Basis der Analysen ist eine gründliche **Datenerhebung vor Projektbeginn**. Dies sollte, soweit vorhanden, Daten aus benachbarten Bohrungen, Literatur, Landesämtern, Seismik, aber auch Analogaufschlüssen und der World Stress Map (Weltspannungskarte WSM) enthalten (Abb. 1). Während aus Analogaufschlüssen erste Erkenntnisse über dominante Rissrichtungen in der Lagerstätte gewonnen werden können, liefert die Weltspannungskarte Auskunft über Spannungsrichtungen einer Region.

2.1 Modellerstellung

Die Daten fließen in die Entwicklung der entsprechenden **Modelle** ein (Abb. 2), welche die Grundlage für die weitergehenden Analysen der Bohrungsstabilität, der Planung des Bohrpfad und Auslegung der zulässigen Betriebszustände der geothermischen Anlage bilden. Aus den Informationen zu den Gesteinen werden Abschätzungen der Festigkeiten und ähnlicher relevanter Eigenschaften für das Geomechanikmodell gewonnen.

Das **Strukturmodell** bildet die Informationen zu typischen Klufmustern, Störungen und insbesondere, über den aus Seismikdaten gewonnenen relativen Versatz oder Verschnitt der Störungen, das Spannungsregime (Abschiebung, transzensional, Horizontalverschiebung, transpressiv, Aufschiebung) ab.

Initiale Datenerhebung

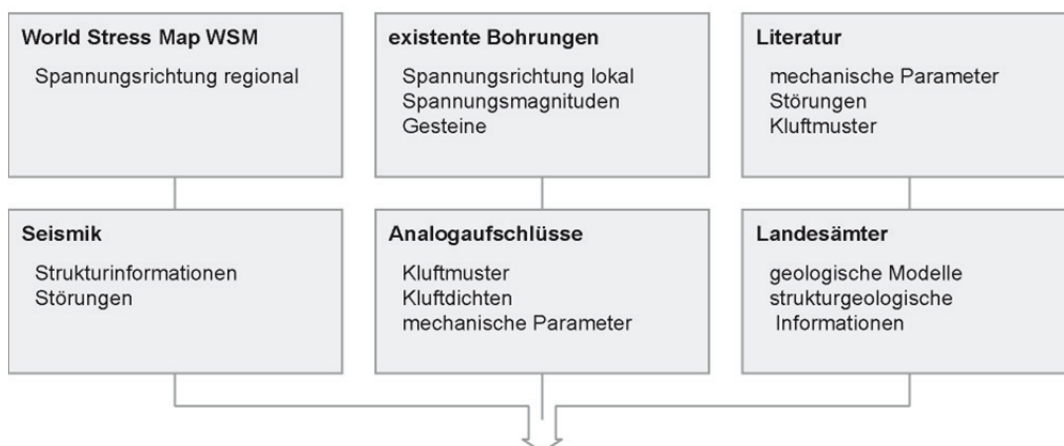


Abb. 1: Initiale Datenerhebung. In einem frühen Stadium des Projektes sollten umfangreiche Daten erheben werden, welche die Grundlage für die zu entwickelnden Struktur-, Spannungs- und Geomechanikmodelle bilden. (Diskussion siehe Text).

Fig. 1: Initial data collection. In an early stage of the project a complete set of data should be collected that serves as basis for the development of the structural, stress and geomechanics model (for discussion see text).

Planungsphase: Modellerstellung

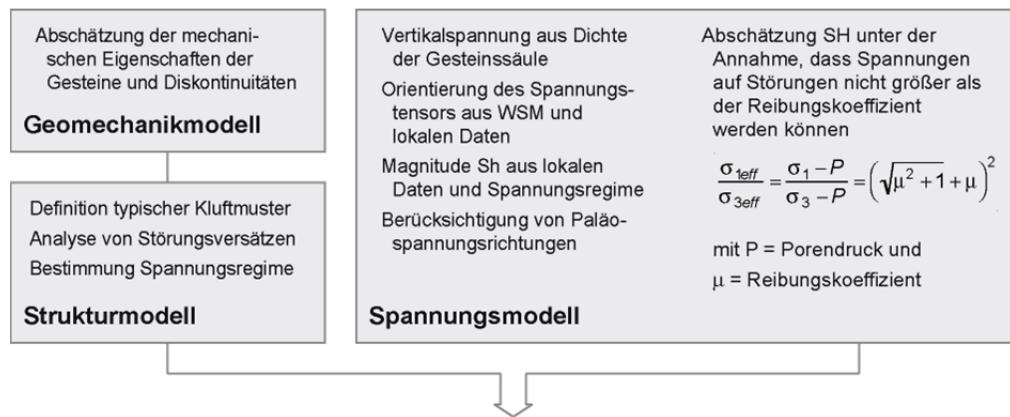


Abb. 2: Modellerstellung. Aus den initial erhobenen Daten werden das Geomechanik-, Struktur- und Spannungsmodell abgeleitet (Diskussion im Text).

Fig. 2: Modelling. From the initial data collection the geomechanics, structural and stress model are developed (see text for discussion). Die typischen verwendeten Reibungskoeffizienten sind $\mu = 0,6-1,0$.

Über den räumlichen Bezug von Spannungsfeld, Störungs-kinematik und ggf. Extensionsklüften kann das Spannungsfeld über das Störungsmuster nach dem Anderson'schen Störungsprinzip rückgerechnet werden (Anderson, 1951). Jedoch müssen Paläospannungsfelder mit als Ursache für den beobachteten Störungsversatz in Betracht gezogen werden, so dass nicht ohne weiteres vom Störungsversatz auf das rezente Spannungsfeld geschlossen werden kann. Ein Beispiel hierfür ist das Bayerische Molassebecken, wo die Genese von E bis ENE orientierte Abschiebungen eine etwa N-S gerichtete kleinste Horizontalspannung erfordern, das rezente Spannungsfeld aber durch eine N-S gerichtete maximale Horizontalspannung charakterisiert ist. Damit sind die Störungen, die den Thermalwasserfluß im Molassebecken kontrollieren, fossile Abschiebungen.

Die **Spannungsmagnituden** können über Spannungsfeld-Modelle unter der Annahme entwickelt werden, dass in-situ Spannungsgrößen in der spröd-deformierenden Erdkruste nicht den Reibungskoeffizienten (also die Bedingung für Reibungsgleiten) an optimal orientierten Störungsflächen überschreiten können (Jaeger et al. 2007; Moeck et al. 2009). Limitierende Spannungswerte können unter Anwendung der in der Abbildung 2 gegebenen Gleichung für jedes beliebige Spannungsfeld unter der Annahme des Anderson'schen Störungsprinzips (op. cit.) vorhergesagt werden. Somit ist bei bekannter Vertikalspannung, das dem Auflastdruck durch das Deckgebirge entspricht, und bei bekannter minimaler Horizontalspannung S_{hmin} (ermittelt durch z.B. leak-off-Tests) der Wert von S_{Hmax} limitiert und daher sehr gut abschätzbar.

2.2 Geomechanische Bohrplanung

Die Auslegung des Spülungsfensters bestimmt die Spanne der Spülungsdrücke bestimmt, für welche keine signifikanten Nachfälle oder aber Spülungsverluste zu erwarten sind (Abb 3). Konventionell wird hierbei die kleinste Hauptspannung als maximales Spülungsgewicht angenommen, da so kein hydraulisches Risswachstum zu erwarten ist. Der in-situ Porendruck wird als untere Grenze für den Spülungs-

druck angenommen, da so kein Zufluss in die Bohrung mit negativem Einfluss auf die Spülung und Bohrungsbeherrschung zu erwarten sind.

Eine erste Erweiterung der konventionellen Auslegung stellt die Berücksichtigung der durch die Bohrung induzierten Spannungsumlagerungen dar. Hierbei werden die veränderten Spannungen mit Versagensmodellen für Gestein (z.B. Mohr-Coulomb) verglichen und der Kollaps der Bohrung abgeschätzt. Allerdings kann die klassische Analyse eine Beurteilung des Einflusses des vorhandenen Rissinventars, welches vielfach eine Präferenz der Orientierung der Risse aufweist, auf die Bohrungsstabilität nicht leisten. Um die Interaktion von Spannungsumlagerungen, Rissinventar und Bohrungspfad zu analysieren, kann man auf rissmechanische numerische Simulationen zurückgreifen. Hierbei wird explizit das Risswachstum mit rissmechanischen Ansätzen simuliert. Durch eine solche Simulation können Bereiche ausgeprägten Risswachstums im Hinblick auf das Potential von Klufaktivierung, Interaktion von Klüften zur Produktivitätssteigerung oder Minimierung von Nachfall untersucht werden. Eine weiterführende Einführung in die Rissmechanik und deren Anwendung ist in Backers (2010) gegeben.

Abbildung 4 zeigt an einem Beispiel den unterschied zwischen konventioneller und rissmechanischer Analyse des prognostizierten Bohrungsversagens. Während die konventionelle Analyse Ausbrüche in Richtung Sh vorhersagen würde, zeigen die rissmechanische Simulationen, welche mittels roxol (www.roxol.de) ausgeführt wurden, zum einen wenig Interkonnektion der Risse, was wenig Nachfall erwarten lässt, und eine deutliche durch das Rissinventar induzierte Ablenkung aus der erwarteten Richtung. Die rissmechanische Forschungssimulationssoftware roxol der geomecon GmbH basiert auf der Erweiterten Finite Elemente Methode und ist für die Simulation von Risswachstum und –interaktion in Geomaterialien entwickelt worden. Somit lassen sich durch die rissmechanische Simulation der Bohrfad und das Spülungsprogramm optimieren und hieraus eine erhöhte Sicherheit gegen sidetracking-Maßnahmen und Querschnittverlust bei Endteufe erreichen.

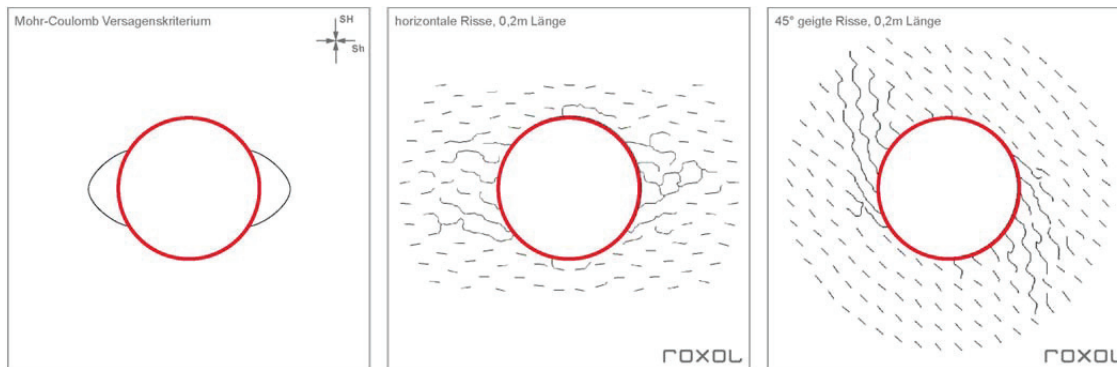


Abb. 4: Modellerstellung: Aus den initial erhobenen Daten werden das Geomechanik-, Struktur- und Spannungsmodell abgeleitet (Diskussion im Text). $SH = 16\text{MPa}$, $Sh = 8\text{MPa}$.

Fig. 4: Modelling. From the initial data collection the geomechanics, structural and stress model are developed (see text for discussion).

Planungsphase: geomechanische Bohrplanung

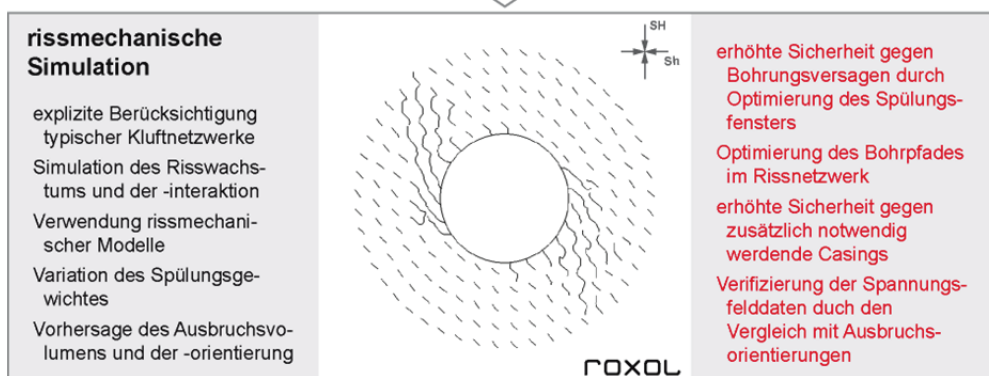
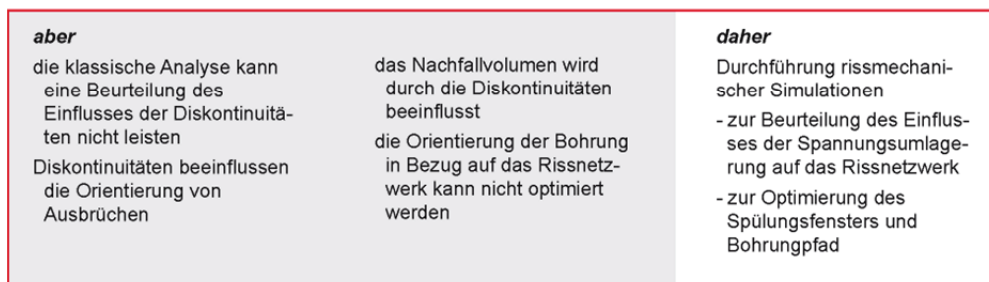
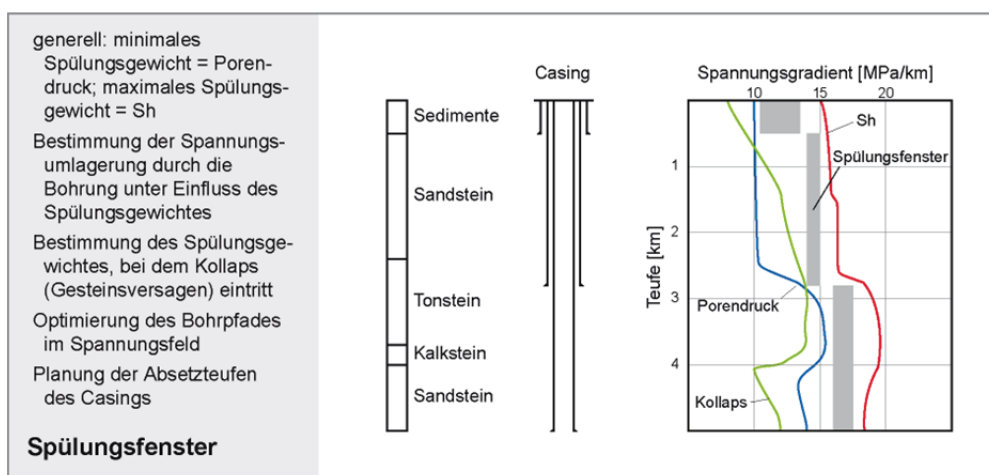


Abb. 3: Geomechanische Bohrplanung: Neben der konventionellen Ermittlung des Spülgewichtes, welche Strukturinformationen i.W. nicht berücksichtigt, wird eine rissmechanische Simulation in Ergänzung zur Berücksichtigung der Strukturinformationen vorgeschlagen.

Fig. 3: Geomechanical well planning. In addition to the conventional determination of the mud window, a fracture mechanics based simulation campaign is suggested to take advantage of the available structural information.

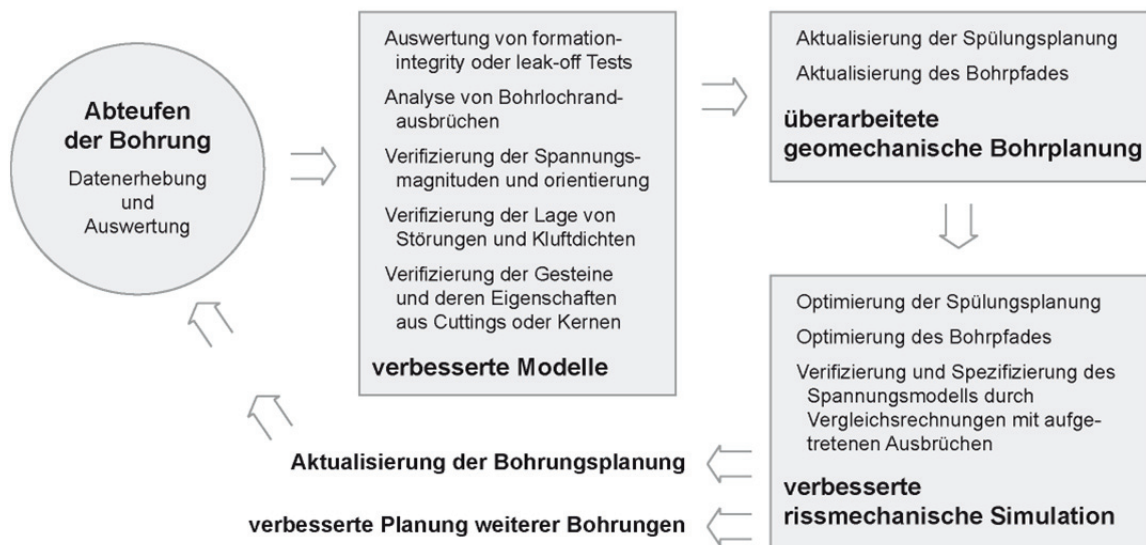
Bohrphase: laufende iterative Optimierung der Modelle und Planung

Abb. 5: Iterative Optimierung der Modelle und Planung.

Fig. 5: Iterative optimisation of modelling and planning.

2.3 Optimierung der Modelle und Planung

Während des Abteufens der Bohrung werden dann alle verfügbaren Informationen laufend analysiert um die Modelle zu verbessern und die Planungen zu aktualisieren (Abb. 5). Parallel hierzu wird auch die Planung etwaiger weiterer Bohrungen optimiert, die Aussagekraft der Analysen aufgrund der verbesserten Modelle gesteigert und das Risiko kostenintensiver Havarien gesenkt.

3 Schlussfolgerungen

Durch die Kombination von strukturgeologischen und geo(riss)mechanischen Arbeitsmethoden lässt sich die Nutzung der vorhandenen Daten bei der Erstellung tiefengeothermischer Tiefbohrungen verbessern und das Risiko von Havarien bei der Bohrerstellung besser abschätzen. Im Gegensatz zur konventionellen Bohrungsstabilitätsplanung lassen sich bei dem vorgestellten integrierten Ansatz Informationen über Strukturdaten berücksichtigen und für eine verbesserte Bohrpfad- und Spülgewichtsplanung (mud window) im Rahmen begleitender rissmechanischer Simulationen nutzen.

Insbesondere die Spannungsbedingungen im Bayerischen Molassebecken mit den hohen Differentialspannungen und in Kombination mit den fossilen Strukturen lässt erwarten, dass die Berücksichtigung der Strukturdaten eine Verbesserung der Sicherheiten gegen Bohrungsversagen bedingt.

Weitergehende Analysen zum Reaktivierungspotential von Störungen durch die Injektionen (slip tendency analysis) oder das Risswachstum durch den Betrieb der geothermischen Anlage zur Vermeidung eines mechanisch induzierten hydraulischen Kurzschlusses sind mittels der vorgestellten Methoden ebenfalls möglich.

Danksagungen

Die Entwicklung von roxol™ und Aspekte des diesem Bericht zugrunde liegenden Vorhabens wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, des Ministeriums für Wirtschaft des Landes Brandenburg und der EU (European Fund for Regional Development, program 'Investment to future') gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

Literatur

- ANDERSON, E.M. (1951): The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain. Oliver & Boyd, Edinburgh.
- BACKERS, T. (2010): Applications of fracture mechanics numerical modelling in rock engineering. First Break. 28.
- BACKERS, T. (2011): Bohrungsgeomechanik. In: Leitfaden Geothermie - Reservoirerschließung bei tiefengeothermischen Projekten. Herausgeber: Agentur Enerchange. 117S.
- JAEGER, J.C., COOK, N.G.W. & ZIMMERMAN, R.W. (2007): Fundamentals of Rock Mechanics. 4th edn., Blackwell, Oxford.
- MOECK, I., SCHANDELMEIER, H., & HOLL, H.G. (2009): The stress regime in Rotliegend reservoir of the Northeast German Basin. Int. J. Earth. Sci. (Geol. Rundsch.), 98/7, 1643-1654.
- QUESADA, D., PICARD, D., PUTOT, C. & LEGUILLON, D. (2008) The role of the interbed thickness on the step-over fracture under overburden pressure. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46, 281-288.