

Spannungsfeldmodellierung anhand historischer Daten der Steinkohle- Exploration zur Festlegung von Bohrlochzielen für die Geothermie in NRW

Tobias Meier¹, Daniel Bücken^{1,2}

¹ geomecon GmbH, Reuchlinstr. 10, 10553 Berlin, Deutschland

² Arbeitsgruppe Ingenieurgeologie und Felsmechanik, Institut für Geologie, Mineralogie und Geophysik, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstraße 150, 44801 Bochum

tobias.meier@geomecon.de

Keywords: Spannungsfeld, Karbon, Geothermie, Reaktivierungspotential, Dilatanzpotential

ABSTRAKT

Die vorliegende Arbeit präsentiert einen Workflow, der aus Bergbaualtdaten einen Mehrwert für die geothermische Exploration schafft. Dazu konnte aus alten Bohrlochlogs das Spannungsfeld im Untersuchungsgebiet bestätigt und für eine auf dem Reaktivierungs- und Dilatanzpotential basierende weiterführende Planung von Bohrlochlandepunkten für die Geothermie in Nordrhein-Westfalen genutzt werden.

1. EINLEITUNG

Das FuE-Projekt KarboEx (www.karboex.geomecon.de) befasst sich mit der Aufbereitung von Altdaten aus der Steinkohleexploration zur Projektierung von Geothermieprojekten in den Karbonaten des Karbon und Devon in NRW. Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens können (bei verglichen mit den üblichen Kosten einer Neuexploration vergleichsweise kleinem Aufwand) geothermische Potentiale der Karbonate abschätzen und weitere Explorationstätigkeit steuern.

Einen wesentlichen Aspekt der geothermischen Exploration stellt das Spannungsfeld dar, da dieses u. a. die Konduktivität von Störungen und Klüften, die Stabilität von Bohrungen sowie das Risiko induzierter Seismizität mitbestimmt. Eine detaillierte Spannungsfeldanalyse reduziert daher die Bohrkosten, die Wahrscheinlichkeit induzierter Seismizität und das Fündigkeitsrisiko.

Aus diesem Grund soll im Rahmen von KarboEx basierend auf alten Bohrlochinformationen das Spannungsfeld der tiefen Karbonate in NRW rekonstruiert werden. Dazu wurde eine Literaturrecherche durchgeführt und aus Kalipermessungen in Bohrungen das Spannungsfeld rückgerechnet und für eine exemplarische Festlegung von Bohrlochzielen am Standort Olfen genutzt.

2.2 GEOLOGISCHE EINFÜHRUNG

Der Großteil der aus der Literatur berichteten Spannungswerte wurden im Zusammenhang mit dem Steinkohlebergbau im Ruhrgebiet erhoben, welcher auf die Kohlen des Oberkarbons abzielte. Die Messwerte entstammen sowohl Explorationsbohrungen, als auch Spannungsmessungen welche innerhalb der Kohlebergwerke ausgeführt wurden.

Nach der Ablagerung wurden die Sedimente des Karbons während der variszischen Orogenese stark deformiert, gefaltet und gestört (Brix et al 1988). Nördlich des Ruhrgebiets überlagern mächtige Kreidesedimente die Gesteine des Karbons (Drozdowski 1993).

2.1 Literaturstudie Spannungsfeld

Nach den Daten des World Stress Map Projektes (Heidbach et al 2016) ist die größte horizontale Hauptnormalspannung im Untersuchungsgebiet ungefähr in Richtung NW-SO bis NNW-SSO orientiert. Dies entspricht den allgemein in Zentraleuropa vorherrschenden Spannungsorientierungen. Rummel (2002) hat basierend auf 370 hydraulischen Stimulationsversuchen die Orientierung der größten horizontalen Hauptnormalspannung (*SH*) für das Ruhrgebiet auf $147 \pm 23^\circ$ bestimmt; Kruszewski et al (2022) haben basierend auf 429 hydraulischen Stimulationsversuchen eine *SH*-Orientierung von $161 \pm 43^\circ$ erarbeitet. Für diese Studie wird der Mittelwert dieser beiden Richtung genutzt; 154° .

Aus der World Stress Map sind für das Ruhrgebiet keine Aussagen zum Spannungsregime möglich. In der westlich angrenzenden Niederrheinischen Bucht ist aus Herdflächenlösungen seismischer Ereignisse erkennbar, dass ein Übergangsregime von Blattverschiebungs- zu Abschiebungstektonik vorherrscht (Hinzen 2003). Dies trifft nach Rummel (2002) ebenfalls für die Region des Ruhrgebietes zu. Auch Klee (2003) geht von einem Blattverschiebungsregime im Oberkarbon bis zu einer Teufe von 4.000 m aus.

Die Magnitude der Vertikalspannung (*SV*) wurde durch eine Vielzahl von Spannungsmessungen von Rummel (2002) gemessen, woraus sich ein mittlerer Vertikalspannungsgradient *grad.SV* von 24,5 MPa/km ergibt. Dies wird durch Klee (2003), Alber et al (2009) und Kruszewski et al (2022) untermauert. Die Magnituden der kleinsten horizontalen Hauptnormalspannung (*Sh*) und *SH*, welche in der Literatur hergeleitet wurden, zeigen eine höhere Spannbreite. Der Gradient für *Sh* (*grad.Sh*) variiert zwischen 13,6 MPa/km (Alber et al 2009; Bücken et al 2022) und 17,3 MPa/km (Alber et al 2009). Aufgrund der zugrundeliegenden Datenmengen sind insbesondere die Werte von Rummel (2002) und Kruszewski et al (2022) hervorzuheben, welche beide einen *grad.Sh* = 14,7 MPa/km postulieren. Klee (2003) prognostiziert für eine Teufe von 4000 m *grad.Sh* = 15,9 MPa/km.

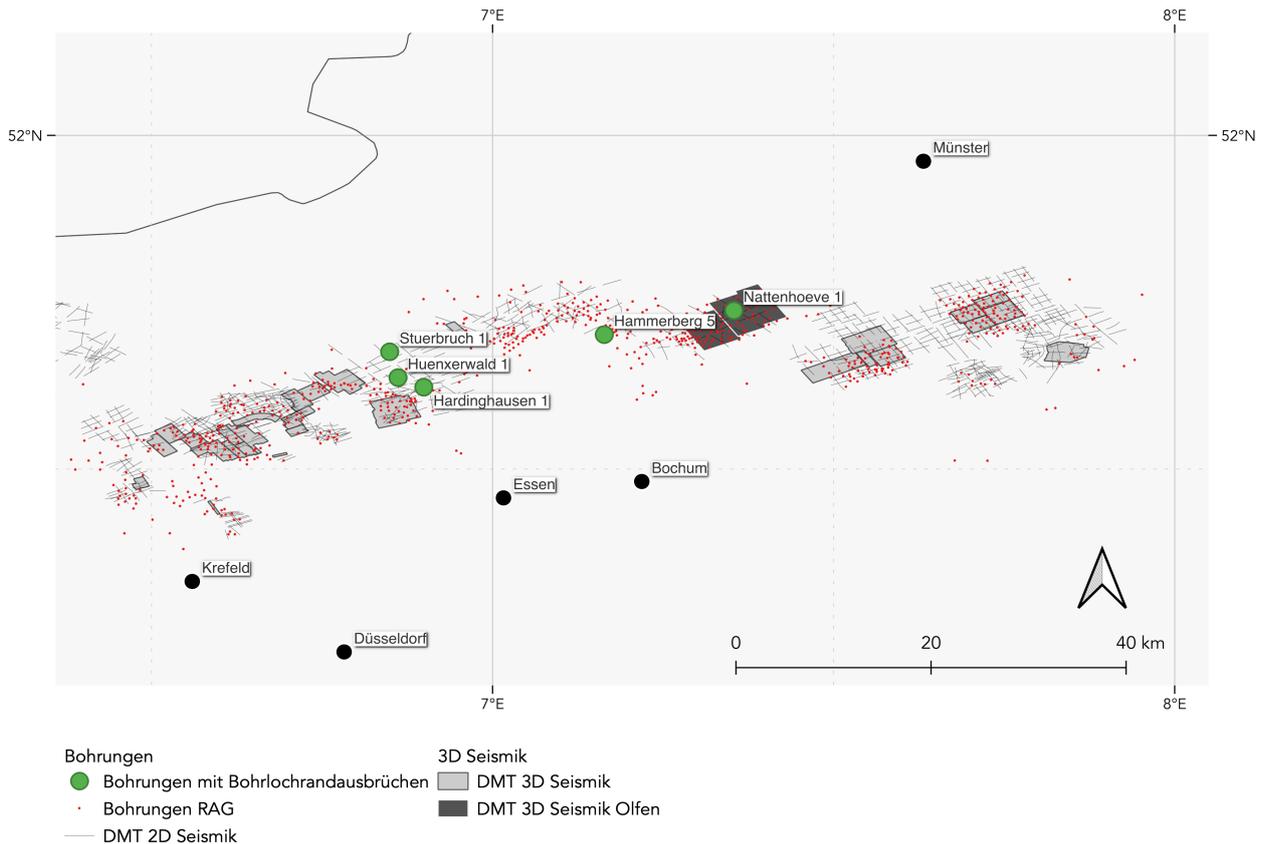


Abbildung 1: Übersichtskarte der im Zuge des Projektes gesichteten Bohrungen. Grün hervorgehoben die Bohrungen welche für eine Spannungsabschätzung im Karbon nutzbare Bohrlochrandausbrüche aufweisen. Zudem sind 2D- und 3D-seismisch erkundete Bereiche dargestellt. Dunkel hervorgehoben das Untersuchungsgebiet Olfen.

Die größte Unsicherheit jedoch liegt in der Bestimmung von $grad.SH$. Die Spannweite in der Literatur liegt zwischen $grad.SH = 25,5 - 35,5 \text{ MPa/km}$ (Alber et al 2009). Rummel (2002) geht von $grad.SH = 29,4 \text{ MPa/km}$ aus, während Kruszewski et al (2022) von $28,8 \text{ MPa/km}$ ausgehen. Klee (2003) extrapoliert $grad.SH = 30,8 \text{ MPa/km}$ für eine Teufe von 4000 m.

Der Porendruckgradient ($grad.Po$) wird in der Literatur konsistent als hydrostatisch angenommen.

Somit ist ein Rahmen an Spannungswerten gegeben, welcher mittels der folgenden Spannungsfeldanalyse basierend auf den erhaltenen Bohrlochdaten weiter begrenzt werden kann. Es ist jedoch hervorzuheben, dass es keine direkten Messungen in geothermisch nutzbaren Teufen gibt, und somit ein wesentlicher Unsicherheitsfaktor bestehen bleibt.

2.2 Spannungsfeldanalyse aus Bohrlochdaten

Um die Spannungsdaten der Literaturstudie zu unterstützen, wurden Bohrungen der Steinkohleexploration auf Bohrlochrandausbrüche hin ausgewertet. Diese Versagensprozesse sind auf konzentrierte Spannungen am Bohrloch, die die Festigkeit des Gesteins lokal überschreiten, zurückzuführen. Mithilfe weiterer Informationen über Teufe, Festigkeit der Formation, Bohrlochorientierung, Spülgewicht und der Ausbruchsbreite an der Bohrlochwand kann aus den aufgetretenen Randausbrüchen das Spannungsfeld mit Hilfe der Kirsch-Gleichungen rückgerechnet werden. Im Rahmen von KarboEx wurden über 800 Bohrungen der RAG AG auf diese

Informationen hin überprüft und nach verschiedenen Kriterien gefiltert. Die Einsicht erfolgte daher im Archiv des Geologischen Dienst Nordrhein-Westfalen (GD NRW).

Demnach besitzen von den 800 Bohrungen, 42 Bohrungen Kaliper-Logs und 7 Bohrungen 4-Arm Kaliper. Dies stellt die minimale Anforderung dar, um Bohrlochrandausbrüche von anderen Versagensformen im Bohrloch zu unterscheiden. Eine genaue Bestimmung des Ausbruchswinkels ist somit nicht möglich und muss mit kleiner 90° angenommen werden. Innerhalb der 7 Bohrungen mit 4-Arm Kaliper zeigen 5 Bohrungen eindeutige Randausbrüche mit Längen $> 1 \text{ m}$ (in Abbildung 1 hervorgehoben). Von diesen Bohrungen durchteuft zudem keine das Karbon in geothermisch relevanten Teufen, was eine Extrapolation der Spannungswerte in entsprechende Teufen notwendig macht.

Aufgrund fehlender gemessener Festigkeitswerte mussten Korrelationen zwischen durchteuften Formationen und Festigkeitswerten aus der Literatur hergestellt werden. Die vom GD NRW übergebenen Schichtenprofile weisen mitunter eine hohe Auflösung auf, so dass die Teufenbereiche mit Randausbrüche im cm-Bereich ihren Lithologien zugeordnet werden konnten. Dennoch bleibt die Unsicherheit in der Festigkeit der Lithologien hoch, so dass die Spannungsfeldabschätzung eine große statistische Streubreite besitzen wird.

Abbildung 2 zeigt beispielhaft die Kaliperspuren entlang eines Bohrloches im Projektgebiet. Zu erkennen sind Ausschläge in der Kaliperspur 2 (C2) während Kaliperspur 1 (C1)

unverändert bleibt. Dies spricht für eine Ovalisierung des Bohrloches, die durch Bohrlochrandausbrüche verursacht sein kann. Dieses Teufenintervall wird der entsprechenden Lithologie zugeordnet und dann diese wiederum einer Festigkeitsverteilung.

In Summe konnten ca. 133 Bohrlochmeter mit Bohrlochrandausbrüchen im Westfalium (A-C) in 5 Bohrungen in Teufen zwischen 600 bis 1650 m bestimmt und ihren Lithologien und Festigkeiten zugeordnet werden. Die Bohrungen stammen aus den Jahren 1980 bis 1985.

Basierend auf der kleinsten Horizontalspannung S_h in der Teufe des Randausbruches, den ermittelten Festigkeiten C_0 , einem angenommenen Ausbruchswinkel θ_b von 45° und der Annahme eines vertikalen Bohrloches ergeben sich unter Vernachlässigung thermischer Spannungen σ^T nach

$$\text{grad. } SH_{BB} = \frac{(C_0 + 2P_0 + \Delta P + \sigma^T - S_h(1 + 2 \cos 2\theta_b))}{z}$$

größte Horizontalspannungsgradienten zwischen 24 und 43 MPa/km, wobei die höheren Gradienten geringeren Teufen entsprechen. Werden die Mittelwerte pro Bohrung entsprechend der Bohrlochmeter mit Randausbrüchen gewichtet, ergibt sich ein $\text{grad. } SH_{BB} = 29,9 \text{ MPa/km}$. Dieser fällt in den bereits aus der Literaturstudie ermittelten Wertebereich für $\text{grad. } SH$ und untermauert das Spannungsregime.

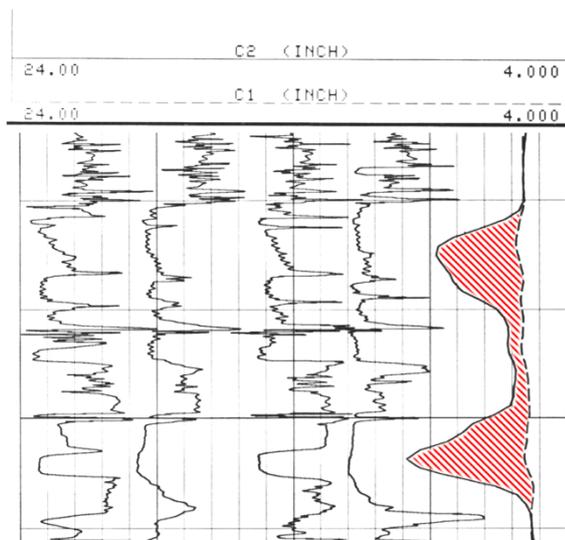


Abbildung 2: Kaliperspuren (C1 & C2) mit Indikatoren für Randausbrüche, rot schraffiert.

2.3 Finalisierung Spannungsfeldanalyse

Aus der Literaturrecherche und der Analyse der Bohrlochrandausbrüche wird folgendes Spannungsfeld angenommen:

Azimut SH :	154°
$\text{grad. } SV$:	24,5 MPa/km
$\text{grad. } SH$:	29,8 MPa/km
$\text{grad. } Sh$:	15,1 MPa/km
$\text{grad. } Po$:	10,0 MPa/km

Das abgeleitete Spannungsfeld wird im Folgenden genutzt, um für das im Rahmen von KarboEx erstellte Untergrundmodell Olfen das Reaktivierungspotential und das Dilatanzpotential von Störungen zu ermitteln. Die Kombination aus Reaktivierungs- und Dilatanzpotential erlaubt darüber hinaus eine Festlegung von Bohrlochzielen.

3. UNTERGRUNDMODELL OLFEN

Das Untergrundmodell Olfen basiert auf seismischen Daten der RAG AG, welche durch die Projektpartner reprozessiert (DMT GmbH & Co. KG) und interpretiert (Geologisches Institut RWTH Aachen) wurden. Zu Details bezüglich der seismischen Interpretation und der Datengrundlage wird auf Kaiser et al (in Vorb.) verwiesen.

Das Untergrundmodell besteht aus 93 Störungsflächen (Abbildung 3). Dominierende Streichrichtung ist WSW-ENE, was mit dem variszischen Streichen übereinstimmt. Das zweit ausgeprägte Streichen ist ca. NW-SE bis NNW-SSE. Die Störungen haben ein durchschnittliches Einfallen von 70° , jedoch sind söhliche bis saigere Segmente vorhanden.

4. REAKTIVIERUNGSPOTENTIAL UND DILATANZPOTENTIAL

Die Reaktivierung einer Störungsfläche tritt ein, wenn sich das lokale Spannungsfeld so verändert, dass das Verhältnis von Scher- zu Normalspannung auf der Trennfläche einen gebirgsspezifischen kritischen Wert überschreitet, welcher als Reibungsbeiwert μ bezeichnet wird. Das Verhältnis von Scher- zu Normalspannung wird dabei als Reaktivierungspotential RP bezeichnet (Morris et al, 1996):

$$RP = \frac{\tau}{S'_n} = \frac{\tau}{S_n - P_0}$$

mit τ als Scherspannung, S'_n bzw. S_n als effektive bzw. absolute Normalspannung auf der Trennfläche und P_0 als Porendruck. Das kritische Reaktivierungspotenzial RP_{krit} , ab welchem es zur Reaktivierung der Trennfläche kommt, entspricht dem Reibungsbeiwert μ :

$$RP_{krit} = \mu$$

Das Reaktivierungspotenzial einer Trennfläche hängt in großem Maß auch von der Orientierung der betrachteten Trennflächen relativ zu den Hauptspannungen ab. Für diese Studie wird von $\mu = 0,8$ ausgegangen.

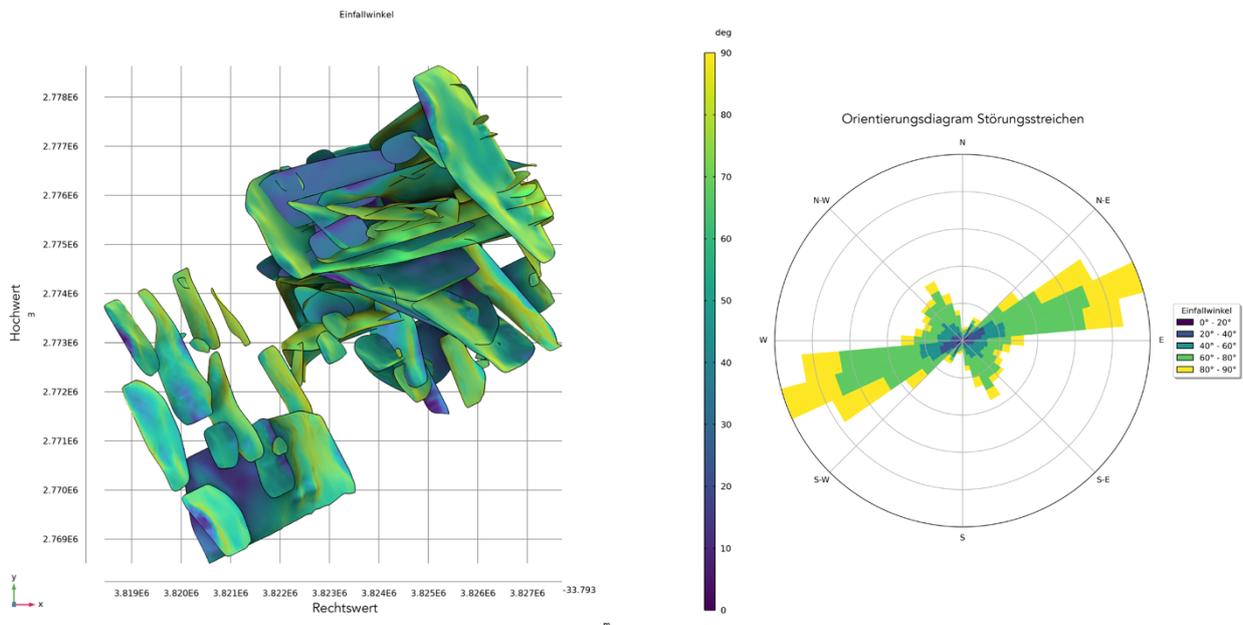


Abbildung 3: Untergrundmodell Olfen. Links: Aufsicht der seismisch interpretierten Störungsflächen (Kaiser et al, in Vorb.), farblich kodiert der Einfallswinkel der Flächen. Die X-Achse entspricht Rechtswerten und die Y-Achse entspricht Hochwerten in EPSG: 3034. Rechts: Streichen der Störungsflächen, farblich kodiert der Einfallswinkel der Flächen.

Die Wahrscheinlichkeit der Dilatanz und des damit verbundenen Fluidflusses auf einer Trennfläche kann mittels des Dilatanzpotentials DP bewertet werden. Das Dilatanzpotential wurde von Ferrill et al (1999) wie folgt definiert:

$$DP = \frac{S'_1 - S'_n}{S'_1 - S'_3}$$

wobei S'_1 die größte effektive Hauptnormalspannung und S'_3 die kleinste effektive Hauptnormalspannung kennzeichnet. DP kann dabei zwischen null (geringste Dilatanz) und eins (höchste Dilatanz) variieren.

4.1 Analytische Auswertung RP & DP

Das Reaktivierungspotential RP sowie das Dilatanzpotential DP können für alle Störungs- bzw. Trennflächenorientierungen innerhalb eines bekannten/angenommenen Spannungsfeldes berechnet werden. Die Richtungsabhängigkeit von RP und DP für Trennflächen in einem gegebenen Spannungsfeld lässt sich in einer unteren Halbkugelprojektion (sogenannter Pol-Plot) analytisch darstellen. In Abbildungen 4 und 5 sind jeweils RP bzw. DP dargestellt, sowie die Polpunkte der Störungsflächensegmente des Untergrundmodells.

RP ist maximal für Störungsflächen, welche ca. N-S bzw. NW-SE streichen und dabei möglichst saiger stehen. Das geringste RP weisen Störungsflächen auf, welche unabhängig vom Einfallswinkel ca. ENE-WSW streichen, also parallel zum variszischen Streichen, und Störungsflächen welche NNW-SSE streichen und saiger stehen. Die Mehrheit der Störungssegmente im Gebiet Olfen weist RP -Werte geringer 0,3 auf; es ist jedoch eine größere Anzahl kritischer gespannter Störungssegmente vorhanden.

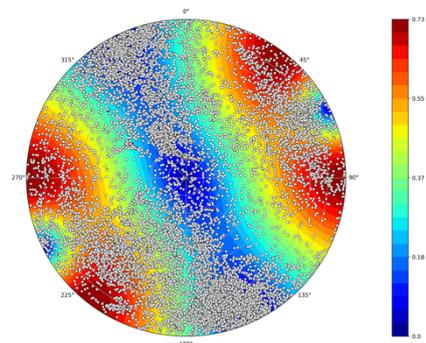


Abbildung 4: Stereographische Projektion des Reaktivierungspotentials im Gebiet Olfen. Die schwarz umrandeten weißen Punkte stellen die Polpunkte zu den Störungsflächenelementen im Modell dar.

DP ist maximal für Störungsflächen, welche möglichst saiger stehen und NNW-SSE streichen. Das geringste DP weisen Störungsflächen auf, welche möglichst saiger stehen und ca. ENE-WSW streichen, also parallel zum variszischen Streichen. Der Großteil der Störungssegmente im Gebiet Olfen weist DP -Werte geringer 0,2 auf; es ist jedoch auch eine größere Anzahl Störungssegmente vorhanden, welche ein hohes DP aufweisen.

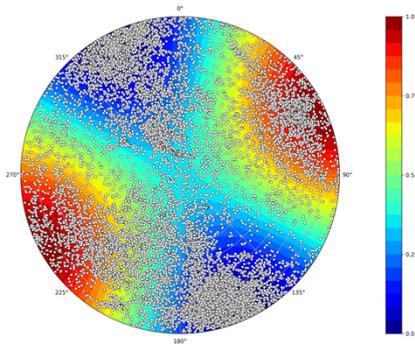


Abbildung 5: Stereographische Projektion des Dilatanzpotentials im Gebiet Olfen. Die schwarz umrandeten weißem Punkte stellen die Polpunkte zu den Störungsflächenelementen im Modell dar.

4.2 Numerische Auswertung RP & DP

Im Vergleich zum analytischen Ansatz hat die numerische Auswertung von RP und DP den Vorteil, dass sie die räumlich nicht zuordnungsbaaren Informationen des analytischen Ansatzes im Untergrundmodell darstellen kann. Somit wird die lokale Verteilung von RP und DP auf den Störungsflächen darstellbar, wodurch eine dezidierte Bohrzielplanung und Risikobeurteilung möglich wird. Für die geothermische Exploration sind gering vorgespannte Bereiche (geringes RP) hoher potentieller Dilatanz (hohes DP) attraktiv, da diese eine hohe geomechanische Stabilität sowie erhöhte Trennflächenpermeabilitäten aufweisen.

Die graphische Darstellung von RP (Abbildung 6) und DP (Abbildung 7) verdeutlicht die komplexe Verteilung kritisch und unkritisch vorgespannter bzw. dilativer und nicht dilativer Bereiche. Generell sind die variszisch streichenden Störungen als stabil einzuordnen, jedoch gleichzeitig als kaum dilatativ anzusehen, und somit für die geothermischen Exploration nicht besonders attraktiv. Vielversprechende Dilatanz weisen insbesondere NNW-SSE streichende Störungsflächen auf. Diese sind jedoch oftmals kritisch gespannt, und daher für die geothermische Exploration mit Risiko behaftet. Somit ist eine gekoppelte Betrachtung von RP und DP nötig, um die attraktivsten Bereiche zu finden.

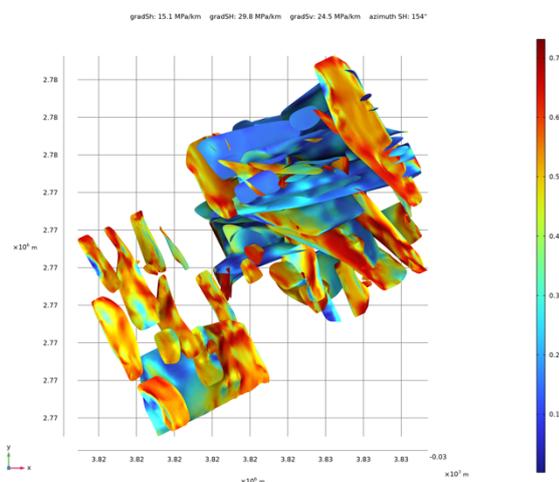


Abbildung 6: Reaktivierungspotential der Störungsflächen im Gebiet Olfen.

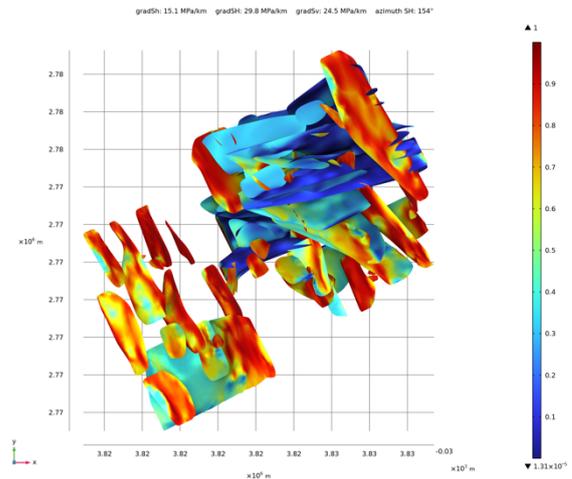


Abbildung 7: Dilatanzpotential der Störungsflächen im Gebiet Olfen.

7. FESTLEGUNG BOHRZIELE

Aus RP und DP allein lassen sich für die geothermische Exploration geomechanisch attraktive Bereiche der Störungsflächen nur schlecht identifizieren. Bereiche mit hohem DP können sowohl ein hohes als auch ein niedriges RP aufweisen, und Bereiche mit niedrigem RP nicht automatisch ein hohes DP aufzeigen. Daher ist eine holistische Betrachtung beider Potentiale notwendig, welche Bereiche mit hohem DP und möglichst niedrigem RP kennzeichnet. Dies lässt sich in einem RP gegen DP -Plot, basierend auf Ferrill et al (2020), graphisch darstellen (Abbildung 8). Zum Herausstellen möglichst attraktiver Bereiche wird der Faktor DP_μ genutzt, welcher dem DP im Reaktivierungsfall entspricht.

In einem gegebenen Spannungsfeld hängt DP_μ vom Reibungsbeiwert und der größten sowie kleinsten effektiven Hauptnormalspannung ab, aus welchen sich die effektive Normalspannung der am kritischsten orientierten, zuerst versagenden Trennfläche, $S'_{n,krit}$ bestimmen lässt:

$$S'_{n,krit} = S'_3 + \frac{S'_1 - S'_3}{2} - \frac{S'_1 - S'_3}{2} * \frac{\mu}{\sqrt{\mu^2 + 1}}$$

DP_μ lässt sich dann wie folgt berechnen:

$$DP_\mu = \frac{S'_1 - S'_{n,krit}}{S'_1 - S'_3}$$

Wie in Abbildung 8 farblich gekennzeichnet, nehmen DP -Werte oberhalb DP_μ zu, während die entsprechenden RP -Werte abfallen. Diese analytische Betrachtung lässt sich auch numerisch im Untergrundmodell darstellen, wodurch eine Bestimmung geomechanisch attraktiver, potentieller Bohrziele möglich wird. Für den Standort Olfen sind dies Störungssegmente, welche möglichst saiger stehen und NNW-SSE streichen (Abbildung 9).

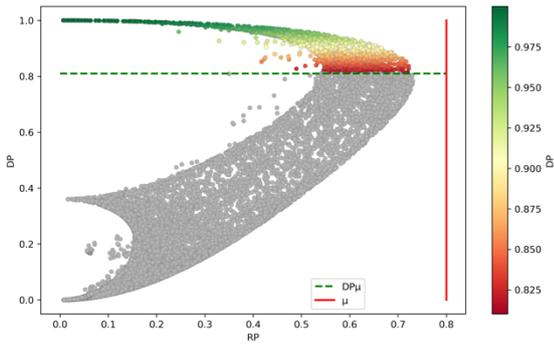


Abbildung 8: Dilatanzpotential als Funktion des Reaktivierungspotentials für die Störungen im Gebiet Olfen. Rot durchgezogene Linie: μ ; grün gestrichelte Linie: DP_{μ} . Farblich dargestellt $DP > DP_{\mu}$.

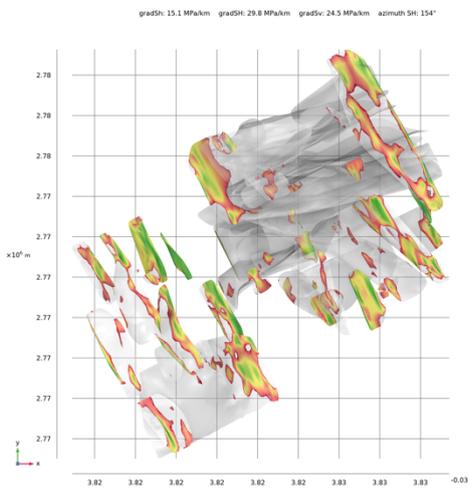


Abbildung 9: Geomechanisch attraktive Bereiche im Gebiet Olfen, für welche $DP > DP_{\mu}$ gilt; farblich dargestellt das DP dieser Bereiche. Je grüner die Farbe, desto höher DP und desto geringer RP.

8. AUSBLICK

Die präsentierte Analyse zeigt potentielle Bohrziele im Gebiet Olfen für eine geothermische Nutzung von Störungszonen aus geomechanischer Sicht auf. Sie basiert auf einem aus Literatur- und Bohrlochdaten hergeleitetem Spannungsfeld sowie einem aus einer Seismik interpretierten Untergrundmodell. Da das Spannungsfeld auf Daten aus max. 1.650 m Teufe basiert und sich eine Teufenabhängigkeit andeutet, ist eine Extrapolation der Spannungen in größere Teufen zum Beispiel über Spannungskoeffizienten generell durchführbar; jedoch sind Spannungsmessungen in größerer Teufe für eine verlässliche Aussage nötig.

REFERENCES

Alber, M., Fritschen, R., Bischoff, M., & Meier, T., 2009. Rock mechanical investigations of seismic events in a deep longwall coal mine. *International*

Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46(2), 408-420.

Brix, M. R., Drozdowski, G., Greiling, R. O., Wolf, R., & Wrede, V., 1988. The N Variscan margin of the Ruhr coal district (Western Germany): structural style of a buried thrust front?. *Geologische Rundschau*, 77(1), 115-126.

Bücken, D., Meier, T. and Backers, T., 2022. Geomechanical effects of seasonal heat storage in abandoned mines. *Geomechanics and Tunneling*, 15(1), pp.82-90.

Drozdowski, G., 1993. The Ruhr coal basin (Germany): structural evolution of an autochthonous foreland basin. *International Journal of Coal Geology*, 23(1-4), 231-250.

Ferrill, D.A., Smart, K.J. and Morris, A.P., 2020. Fault failure modes, deformation mechanisms, dilation tendency, slip tendency, and conduits v. seals. *Geological Society, London, Special Publications*, 496(1), pp.75-98.

Heidbach O, Rajabi M, Reiter K, Ziegler M, WSM Team, 2016. *World Stress Map Database Release 2016*. GFZ Data Services.

Klee, G., 2003. Abschätzung des Spannungszustands im Oberkarbon bis 4 km Tiefe (AS 2.2) als Beitrag zur Machbarkeitsstudie Nutzung der Erdwärme am Standort Ruhr-Universität Bochum (Prometheus). MESY GmbH, Bochum

Kruszewski, M., Klee, G., Niederhuber, T. and Heidbach, O., 2022. In situ stress database of the greater Ruhr region (Germany) derived from hydrofracturing tests and borehole logs. *Earth System Science Data Discussions*, pp.1-33.

Hinzen, K.G., 2003. Stress field in the Northern Rhine area, Central Europe, from earthquake fault plane solutions. *Tectonophysics*, 377(3-4), pp.325-356.

Rummel, F., 2002. Crustal stress derived from fluid injection tests in boreholes. *In situ characterization of rocks*. AA Balkema Publisher, 205-244.

Danksagung

Das Forschungsprojekt KarboEx wird von der Leitmarkt NRW/EFRE unter dem Kennzeichen: „EFRE-0801839“ gefördert.

Wir möchten uns bei allen Projektpartnern sowie beim Geologischen Dienst Nordrhein-Westfalen ausdrücklich bedanken.