

Einfluss von Störungen auf Spannungsfeld, Bohrungen und Klüfte im Malm der bayrischen Molasse

geomecon GmbH

geomecon GmbH
solutions@geomecon.de
Chausseestraße 88, 10115 Berlin
www.geomecon.de

In diesem Band sind die wesentlichen Ergebnisse des Teilprojektes B des Verbundprojektes MAFA mit dem Titel ‚Parametrisierung von Fazies, Diagenese, Struktur- und Spannungsfeld sowie Optimierung der Testabläufe im Malm zur Verringerung des Erfolgsrisikos; Teilprojekt B: Struktur- und Spannungsfeld‘ wiedergegeben.

Das diesem Ergebnisband zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0325673B gefördert.

Bearbeitungszeitraum: 01.12.2013 bis 30.04.2017.

Der Abschlussbericht ist bei der Technischen Informationsbibliothek (TIB) Hannover abrufbar.

Bearbeiter: Dr. Tobias Backers, Daniel Bücken, Dr. Simon Dinter, Carina Grühser, Sara Heft, Dr. Tobias Meier, Pavel Munsch, Kim Nokar, Frank Röske

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das Projekt

Störung oder Fazies? Das ist die Frage, die vielfach im Rahmen der geothermischen Exploration gestellt wird. Während der Ansatz, die Fazies als Explorationsziel zu wählen, geologisch dominiert ist und somit eine deutliche Unsicherheit in sich trägt, ist die Exploration auf Störungen durch ein geomechanisches Kalkül getrieben: da es eine mechanisch angelegte Diskontinuität gibt, könnte diese hydraulisch konduktiv sein und somit ein großes Volumen oder zumindest eine große Fläche drainieren. Diese Überlegung bezieht nur die Störung an sich mit ein, betrachtet aber nicht die mechanischen und somit ggf. auch hydraulisch relevanten Auswirkungen der Störung auf das umgebende Gebirge inklusive dessen Trennflächeninventar.

Da Störungen gegenüber dem umliegenden Gebirge veränderte Eigenschaften haben - tendenziell *weicher* sind - stellen sie Zonen erhöhter Deformation dar, welche zu Spannungsalterationen im umgebenden Gebirge, nebst existenten Trennflächen, führen. Diese Alterationen betreffen sowohl die Magnituden als auch die Orientierung des Spannungstensors. Somit können auf existenten Trennflächen im Gebirge lokal die Spannungen verändert sein.

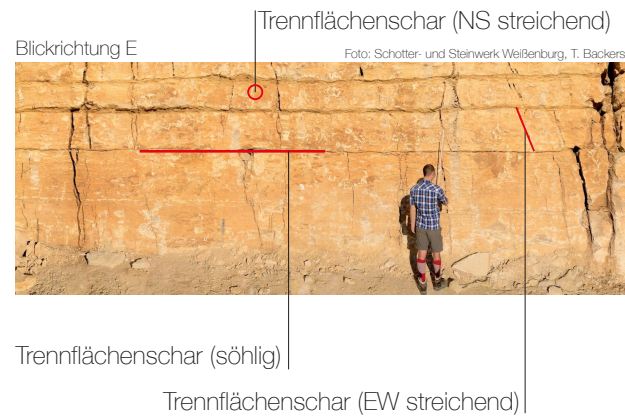
Die Trennflächen im Malm der bayrischen Molasse bilden i.A. ein fundamentales Kluftsystem (Bock 1980), d.h. dass es drei orthogonale Trennflächenorientierungen gibt. Dies sind im Malm die Schichtung, welche in erster Näherung söhlig liegt, und zwei saigere Trennflächenscharen, welche NS und EW streichen; dies wurde im Rahmen des Projektes durch eine Kartierung bestätigt.

Im überregionalen Spannungsfeld des Malms der bayrischen Molasse, in welchem die größte Hauptnormalspannung etwa NS streicht, stehen somit alle drei Trennflächenrichtungen etwa senkrecht zu den Hauptnormalspannungen. Das bedeutet weiterhin, dass die Trennflächen, welche unabhängig von den Störungen vorhanden sind, unter hoher normaler Belastung stehen. Eine erhöhte Normalspannung reduziert wiederum die Transmissivität der Trennfläche, was für die Drainage des Gebirges nachteilig ist.

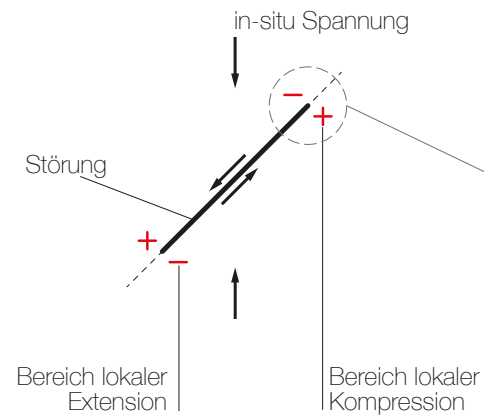
Allerdings führen Spannungsumlagerungen an den Störungszonen zu Spannungsalterationen und -rotationen auf den Trennflächen und erzeugen somit konsequenterweise Regionen, in denen die Trennflächen unter einer zusätzlichen Scher- und reduzierter Normalspannung stehen. An dieser Stelle setzt das im Folgenden umrissene Vorhaben an. Im Rahmen des Projektes wurden großmaßstäbliche Simulationen durchgeführt, die durch die Störungen induzierte Spannungsumlagerungen simulieren. Hieraus wurde ein Kartenwerk erarbeitet, welches für die geothermische Anwendung ein erster Anhaltspunkt sein kann, die Machbarkeit und Herausforderungen eines Projektes einzuschätzen.

Links: Impression von der Felskartierung zur Darstellung der typischen
Trennflächenscharen im Malm. Mitte: schematische Darstellung der
Deformation von Störungen. Rechts: resultierende Spannungsumlagerungen
um Störungen.

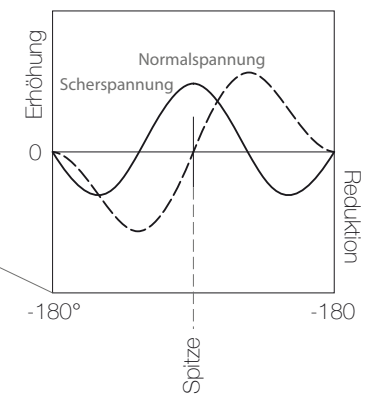
Trennflächensysteme des Malm



Deformation von Störungen



Spannungsumlagerungen um Störungen



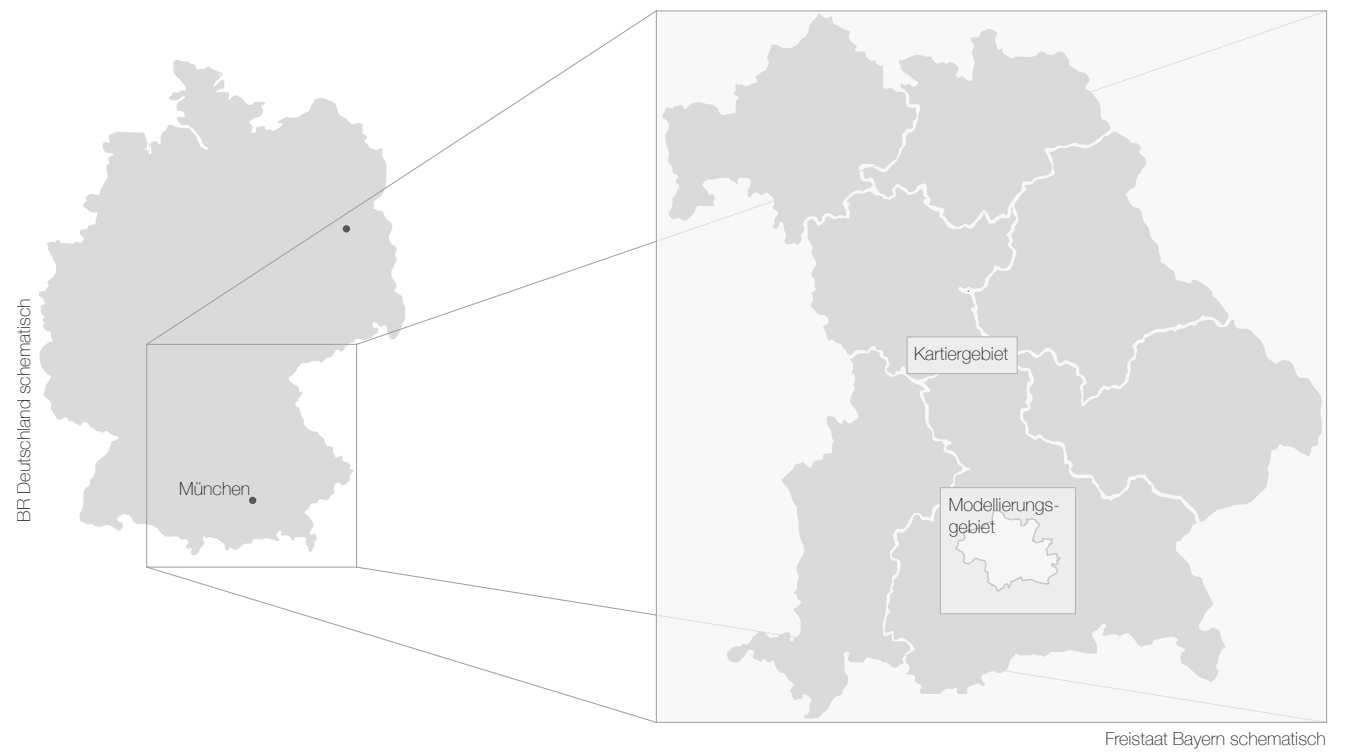
Studiengebiet

Das Modellierungsgebiet befindet sich im Alpenvorland im bayrischen Teil des Molassebeckens und deckt den Großraum München ab. Das Gebiet erstreckt sich von Weilheim im SW nach Kirchberg im NE. Die Himmelsfläche des Gebietes für die numerische Simulation beträgt somit etwa 455.000 ha.

Innerhalb des Untersuchungsgebietes befinden sich eine Reihe geothermischer Kraftwerke (Geothermisches Informationssystem für Deutschland, Stand Januar 2017, www.geotis.de), welche die untersuchten Gesteinseinheiten als Wärmequelle nutzen.

Das typische Trennflächeninventar des Malm wurde in Analogaufschlüssen im Rahmen einer ingenieurgeologischen Felskartierung aufgenommen, das Untersuchungsgebiet liegt nördlich Münchens im Bereich des Altmühltals.

>> Lage des Untersuchungsgebietes für die numerische Simulation, die den Großraum München abdeckt, und der ingenieurgeologischen Trennflächenkartierung im Bereich des Altmühltals.



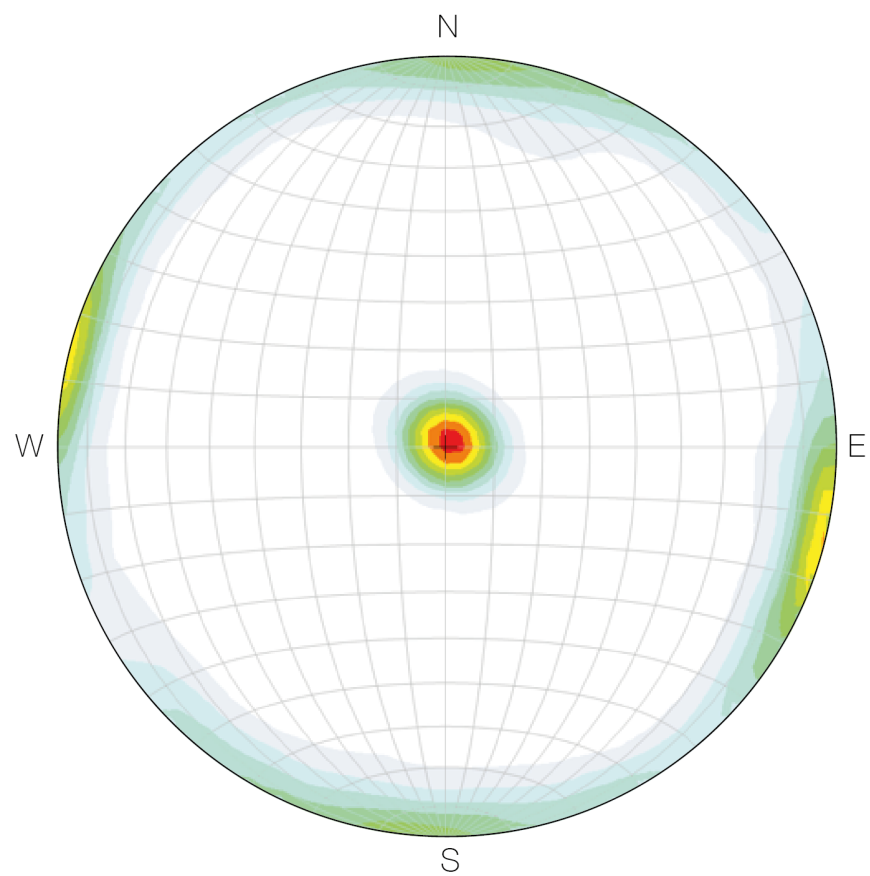
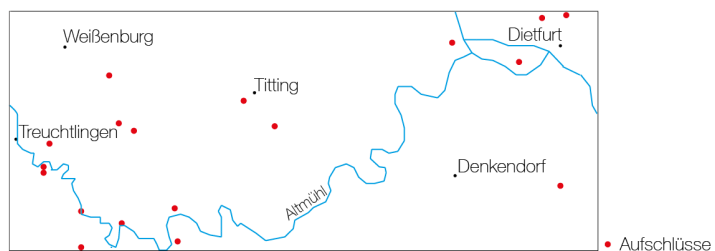
Trennflächeninventar

Um das typische Trennflächeninventar des Malm zu bestimmen, wurden im Sommer 2015 und 2016 jeweils eine ingenieurgeologische Felskartierung durchgeführt. Im Rahmen der Kartierungen wurden in 18 Aufschlüssen unter anderem 3.138 Datenpunkte zur Charakterisierung der Orientierung der Trennflächen aufgenommen. Die Datenmenge, kombiniert mit der räumlichen Verteilung der Aufschlüsse, erlaubt eine repräsentative Beurteilung des Trennflächeninventars der Malm-Kalke und bietet die Möglichkeit der Extrapolation der gewonnenen Daten in das Modellierungsgebiet unterhalb Münchens.

Es zeigt sich, dass für den Malm ein orthogonales Trennflächensystem angenommen werden kann. Hierbei liegt die Schichtung leicht nach Süden einfallend sählig und zwei dazu orthogonale, saigere Trennflächenscharen streichen NS und EW.

Die detaillierte Auswertung der Messkampagnen wurde durch Herrn Pavel Munsch im Rahmen einer Masterarbeit an der TU Berlin durchgeführt. In der Arbeit sind auch weitergehende Analysen berichtet (Munsch 2017).

>> Lokationen der Aufschlüsse der ingenieurgeologischen Trennflächenkartierung und stereographische Projektion mit Dichteverteilung der aufgenommenen Trennflächen im Bereich des Altmühltals.

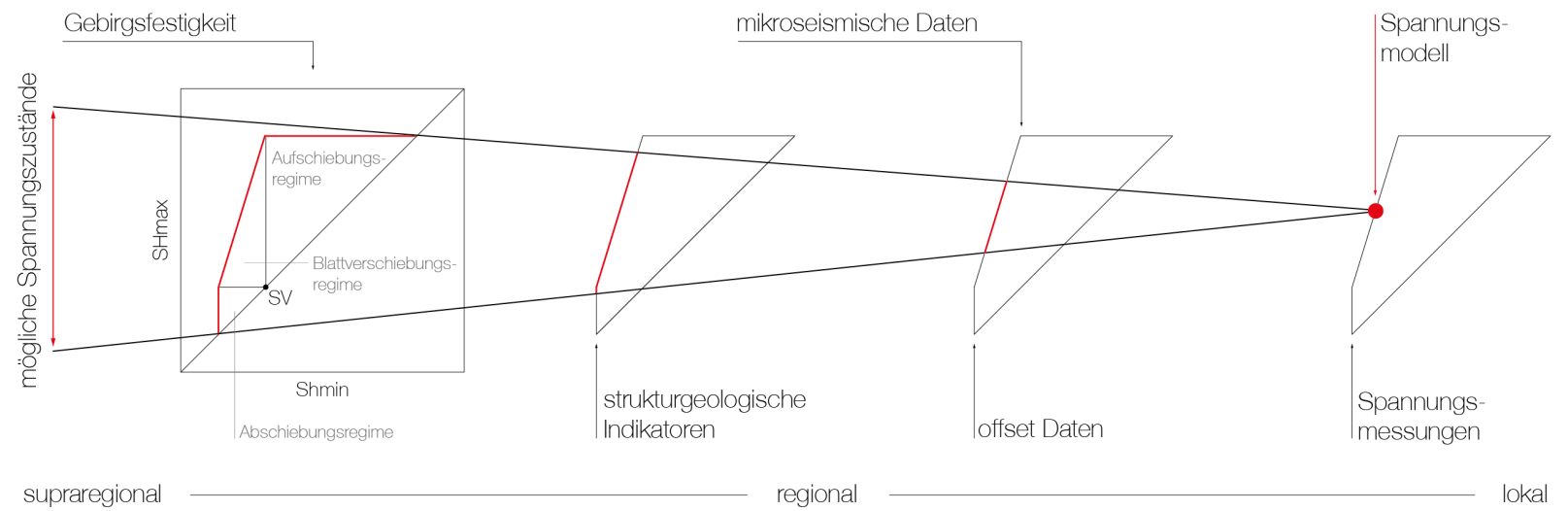


Spannungsmodellierung

Die Ermittlung des in-situ Spannungszustandes ist eine Herausforderung und zugleich eine Notwendigkeit, da das Spannungsfeld eine entscheidende Einflussgröße jeder geomechanischen Analyse darstellt; Spannungen beeinflussen die Stabilität im Tunnelbau, Bergbau und bei Bohrungen, sowie mögliche Injektions- und Förderraten in Geothermie-, Kohlenwasserstoff- oder Sequestrierungsanwendungen (Meier und Backers, 2017). Daher sollte die Abschätzung des Spannungsfeldes mit höchster Sorgfalt geschehen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Analyseansatz, der auf das Konzept der limitierenden Spannungen zurückgeht, weiterentwickelt und auf die verfügbaren Daten des Modellierungsgebietes angewendet.

>> Schematische Darstellung des Workflows, der bei der subregionalen Spannungsmodellierung zur Anwendung kam.



Spannungsfeld

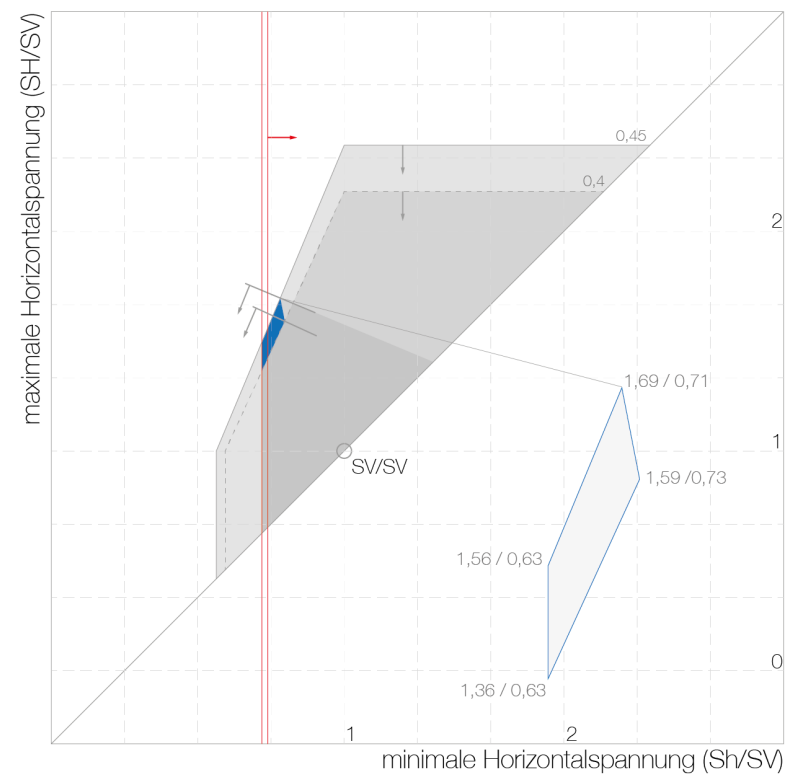
Basierend auf Literaturevidenzen, Messdaten und geomechanischer Modellierung entsprechend des geomecon GmbH Spannungsmodellierungs-Workflows wurde der subregionale Spannungszustand abgeschätzt.

Die größte Hauptnormalspannung streicht etwa NS, der Reservoirdruck kann im Wesentlichen als hydrostatisch angenommen werden und es liegt für den Malm ein Blattverschiebungsregime vor. Aus der geomechanischen Modellierung lassen sich die Spannungen deutlich eingrenzen, und die Spannungs- und Porendruckgradienten sind $S = [\text{grad.SV}; \text{grad.SH}; \text{grad.Sh}; \text{grad.P}] = [24,3; 41,1; 17,3; 9,4] \text{ MPa/km}$.

Während die Eingrenzung der Reibungseigenschaften der Trennflächen für eine langzeitstatische Belastung als relativ gut beurteilt wird, sind die Reibungseigenschaften der Störungen unbekannt. Da keine nennenswerte natürliche Hintergrundseismizität größerer Magnitude dokumentiert ist, was auf kritisch gespannte Störungen schließen ließe, wird davon ausgegangen, dass die Signifikanz dieser Unsicherheit als gering eingestuft werden kann. Somit ist davon auszugehen, dass die Modellierung des Spannungsfeldes als gut bis sehr gut beurteilt werden kann.

Die Eingrenzung des Spannungsregimes ist demgegenüber mit einer größeren Unsicherheit behaftet. Allerdings deutet sich aus den geophysikalischen Interpretationen und Bohrungsstabilitätsindikatoren ein Blattverschiebungsregime ohne Aufschiebungsanteile an.

>> Eingrenzung des Spannungsmodells für den Malm. Zusätzlich zu den Annahmen zur Eingrenzung aus geomechanischer Sicht werden die Ergebnisse mittels der Auswertung von formation integrity tests (rote Linien) und geophysikalischen Messungen weiter eingegrenzt. Die möglichen Spannungszustände sind jeweils grau hinterlegt und multiplizieren sich in der Überdeckung, wenn die Bereiche mehrfach abgedeckt sind.



Ergebnisse der Simulationen

Zur Untersuchung des Einflusses von Störungzonen auf das subregionale Spannungsfeld wurden numerische Simulationen mit Hilfe einer auf der Erweiterten Finiten Elemente Methode (XFEM) basierenden Software roxol™ (www.roxol.de) durchgeführt. Dazu wurden die Informationen über den Verlauf der Störungzonen im Malm auf eine Fläche projiziert, das subregionale Spannungsfeld auf das Modell übertragen und das Modell inklusive Störungzonen mit Materialeigenschaften besetzt. Die numerische Simulation erlaubt die Bestimmung des lokalen Spannungsfeldes im unmittelbaren Umfeld der Störungen.

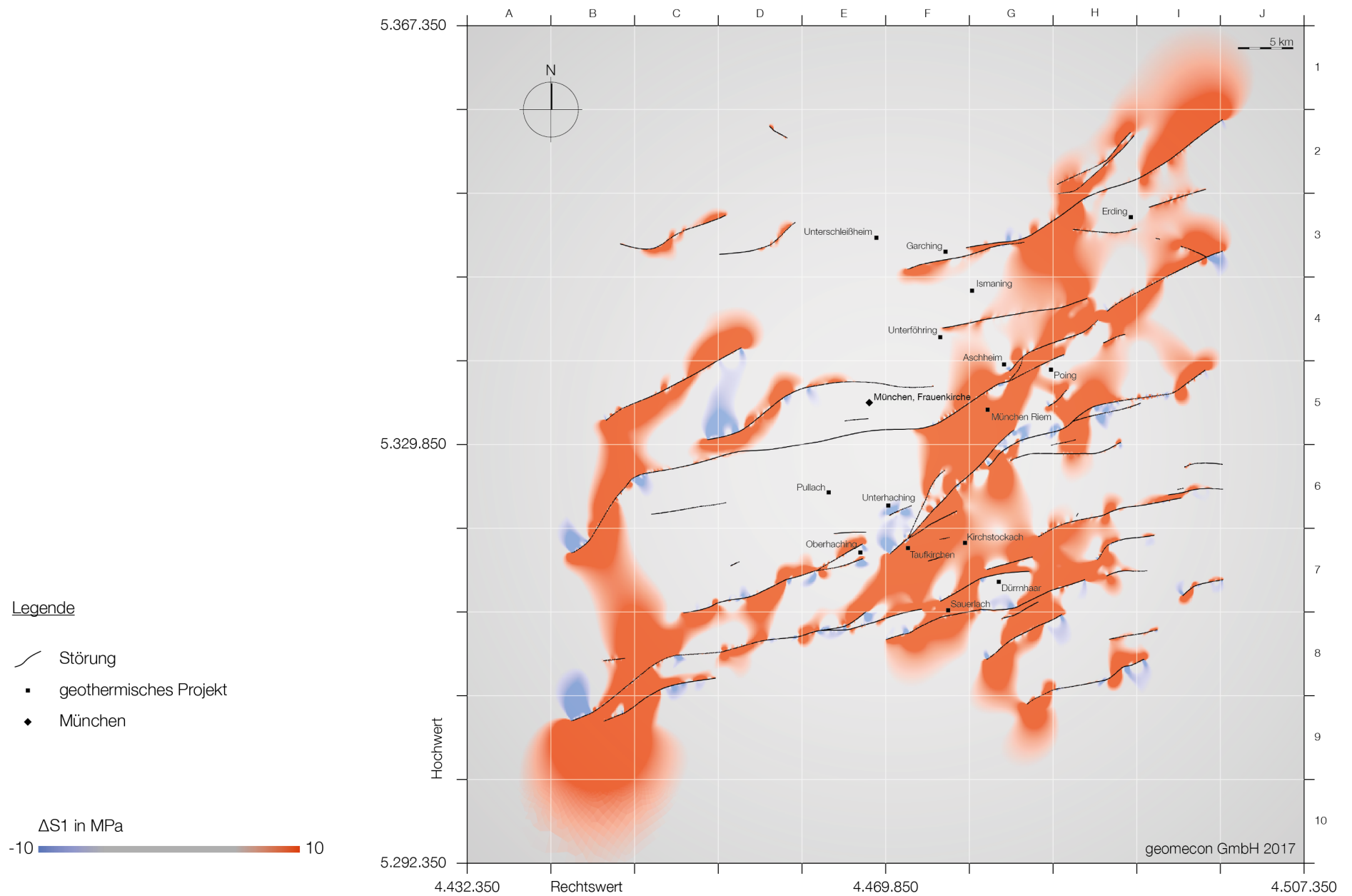
Veränderung der größten Hauptnormalspannung

Die größte Hauptnormalspannung (S1) wird durch das Störungsinventar großräumig alteriert. In der nebenstehenden Abbildung ist zu sehen, dass die Veränderung der größten Hauptnormalspannung ($\Delta S1$) insbesondere an Störungsabschnitten ausgeprägt ist, welche deutlich aus dem EW Streichen abgelenkt sind. Dies ist z.B. im Planquadrat B7 zu sehen.

Ebenso ist der typische Übergang einer Kompression zu einer lokalen Extension durch die Simulationsergebnisse abgebildet, wie er in der Georissmechanik beschrieben ist. So ist in Planquadrat B7 ein Übergang von einer lokalen S1 Erhöhung südlich des Störungsendes zu einer lokalen Erniedrigung von S1 nördlich des Störungsendes zu sehen; dies ist am NE Ende der Störung im Planquadrat I3 ebenso zu sehen; dort allerdings bezüglich der Störungsspur gespiegelt.

Die lokalen Magnitudenveränderungen bedingen ebenso eine Rotation der Richtung der Hauptnormalspannungen; dies ist in den Spannungsrichtungsindikatoren der World Stress Map sichtbar.

>> Darstellung der Veränderung der größten Hauptnormalspannung für den Malm. Vom Simulationsergebnis mit Störungen wurde das Simulationsergebnis ohne Störungen subtrahiert, so dass nur die Veränderungen gegenüber dem subregionalen Spannungsfeld zu sehen sind. In den grauen Bereichen sind die Spannungen nur wenig bis gar nicht verändert, durch blau und rot sind Bereiche gekennzeichnet, in denen deutliche Veränderungen der größten Hauptnormalspannung zu erwarten sind.



Veränderung der kleinsten Hauptnormalspannung

Die kleinste Hauptnormalspannung (S_3) wird ebenso wie die größte Hauptnormalspannung (S_1) durch das Störungsinventar großräumig alteriert. In der nebenstehenden Abbildung ist zu sehen, dass vielfach in Bereichen reduzierter ΔS_1 auch die kleinste Hauptnormalspannung (ΔS_3) alteriert ist. Umgekehrt sind in großvolumigen Bereichen mit erhöhter ΔS_1 auch Erhöhungen von ΔS_3 zu beobachten (vgl. Planquadrant B9). Generell ist ΔS_3 eher reduziert als erhöht. Bereiche erniedrigter ΔS_3 befinden sich meist auf der NE bzw. SW Seite einer Störung oder in Bereichen eng gestaffelter paralleler oder sich verschneidender Störungen.

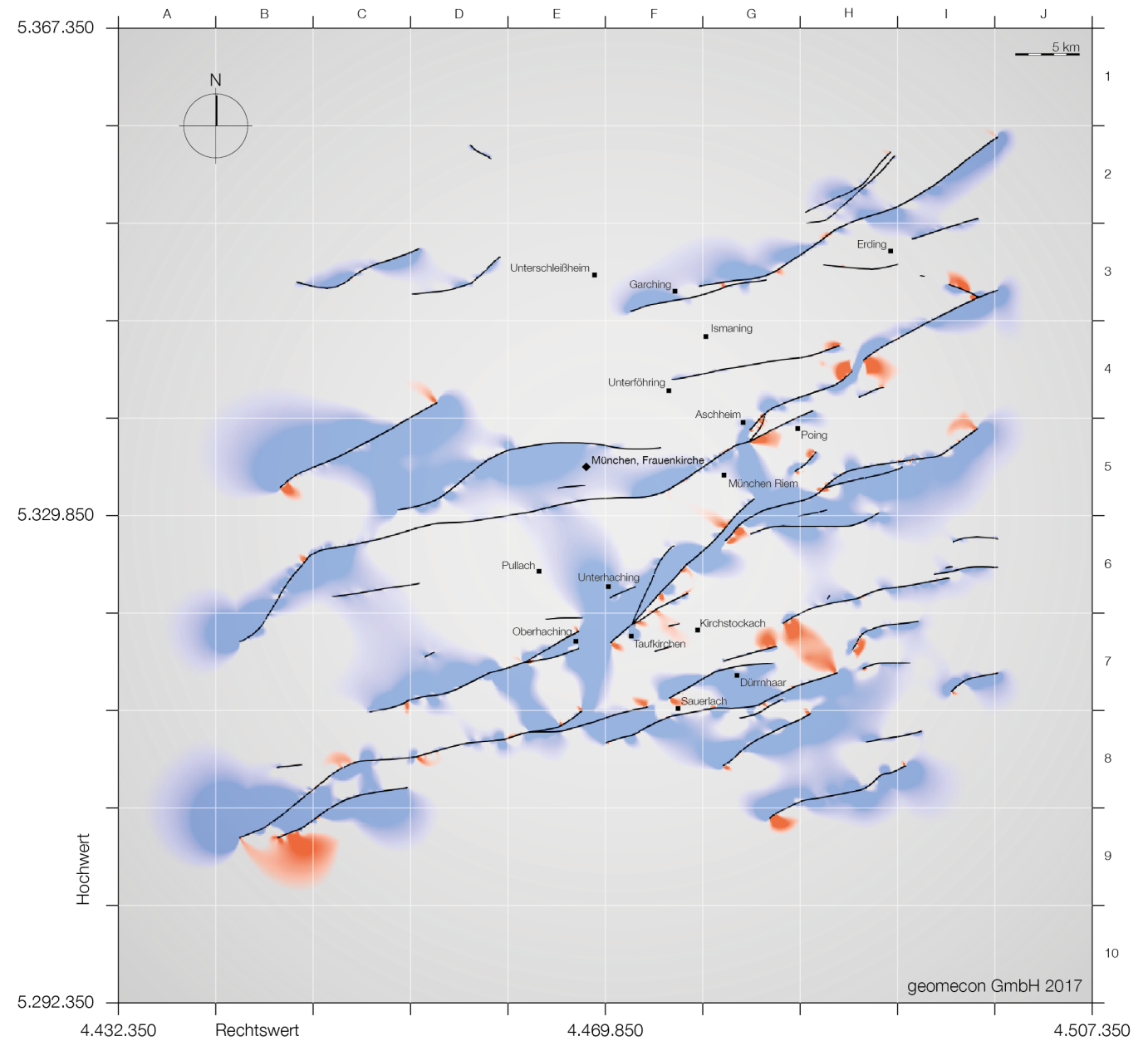
>> Darstellung der Veränderung der kleinsten Hauptnormalspannung für den Malm. Vom Simulationsergebnis mit Störungen wurde das Simulationsergebnis ohne Störungen subtrahiert, so dass nur die Veränderungen gegenüber dem subregionalen Spannungsfeld zu sehen sind. In den grauen Bereichen sind die Spannungen nur wenig bis gar nicht verändert, durch blau und rot sind Bereiche gekennzeichnet, in denen deutliche Veränderungen der kleinsten Hauptnormalspannung zu erwarten sind.

Legende

- Störung
- geothermisches Projekt
- ◆ München

ΔS_3 in MPa

-10 10



Veränderung der maximalen Scherspannung

Bedingt durch die Veränderung der Hauptnormalspannungen ist auch die maximale Scherspannung in einigen Bereichen alteriert. Die Veränderung ist vielfach an Störungszonen bzw. -segmenten, die von der vorherrschenden EW Streichrichtung abweichen, gebunden. Einhergehend mit der Veränderung der Scherspannungsmagnitude kann auch von einer Rotation der Hauptspannungsrichtung ausgegangen werden.

Somit sind die Trennflächen, welche in den Bereichen alterierter maximaler Scherspannung liegen, nicht mehr normal zu den Hauptspannungsrichtungen orientiert. Daher könnte eine erhöhte Scherspannung zu einer Zunahme der hydraulischen Durchlässigkeit aber auch Abnahme der mechanischen Stabilität führen. In den Bereichen wären die Trennflächen leichter zu reaktivieren.

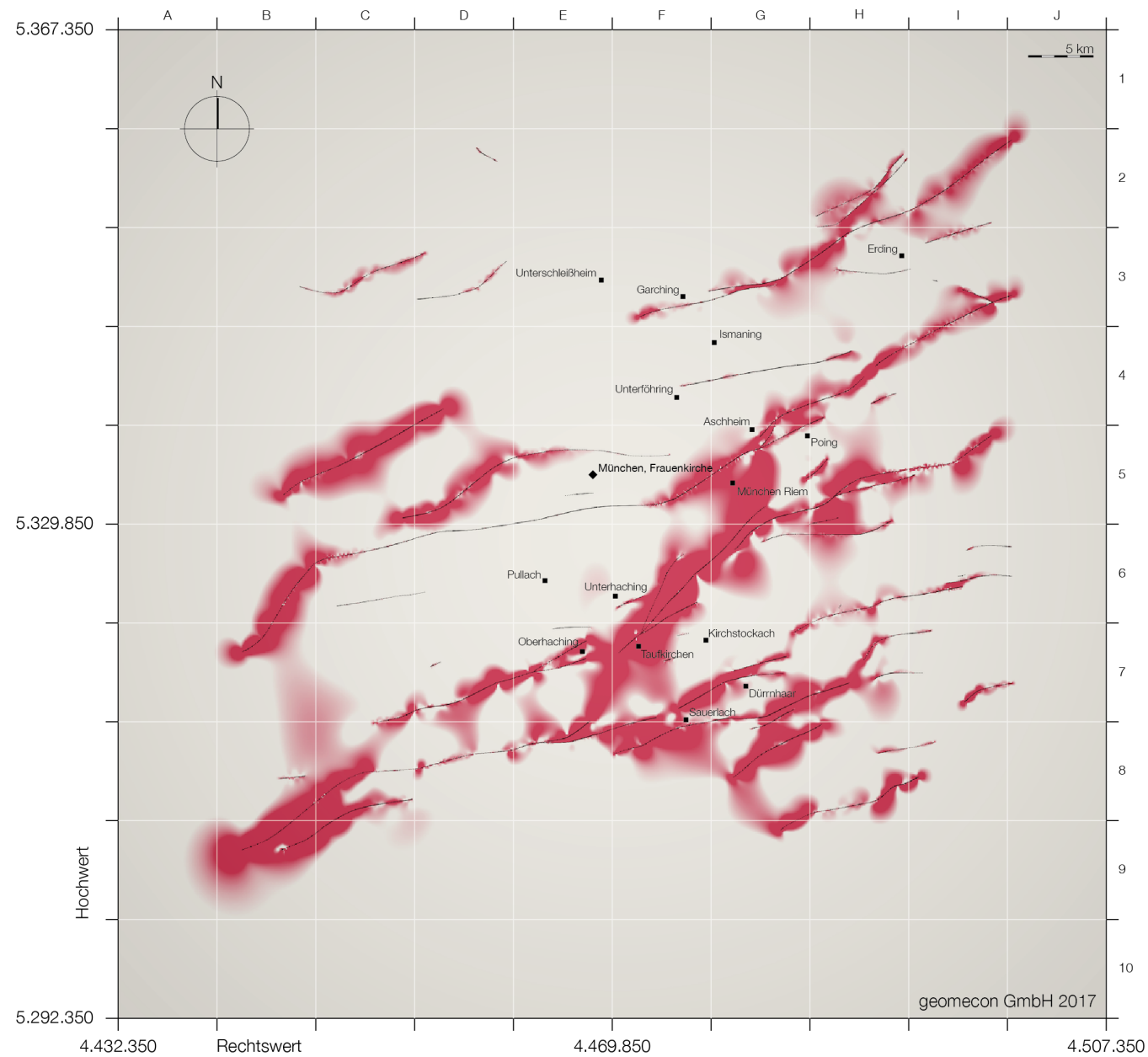
>> Darstellung der Veränderung der maximalen Scherspannung für den Malm. Vom Simulationsergebnis mit Störungen wurde das Simulationsergebnis ohne Störungen subtrahiert, so dass nur die Veränderungen gegenüber dem subregionalen Spannungsfeld zu sehen sind. In den grauen Bereichen sind die Spannungen nur wenig bis gar nicht verändert, durch rot sind Bereiche gekennzeichnet, in denen deutliche Veränderungen der maximalen Scherspannung zu erwarten sind.

Legende

- Störung
- geothermisches Projekt
- ◆ München

$\Delta\tau_{\max}$ in MPa

0 10

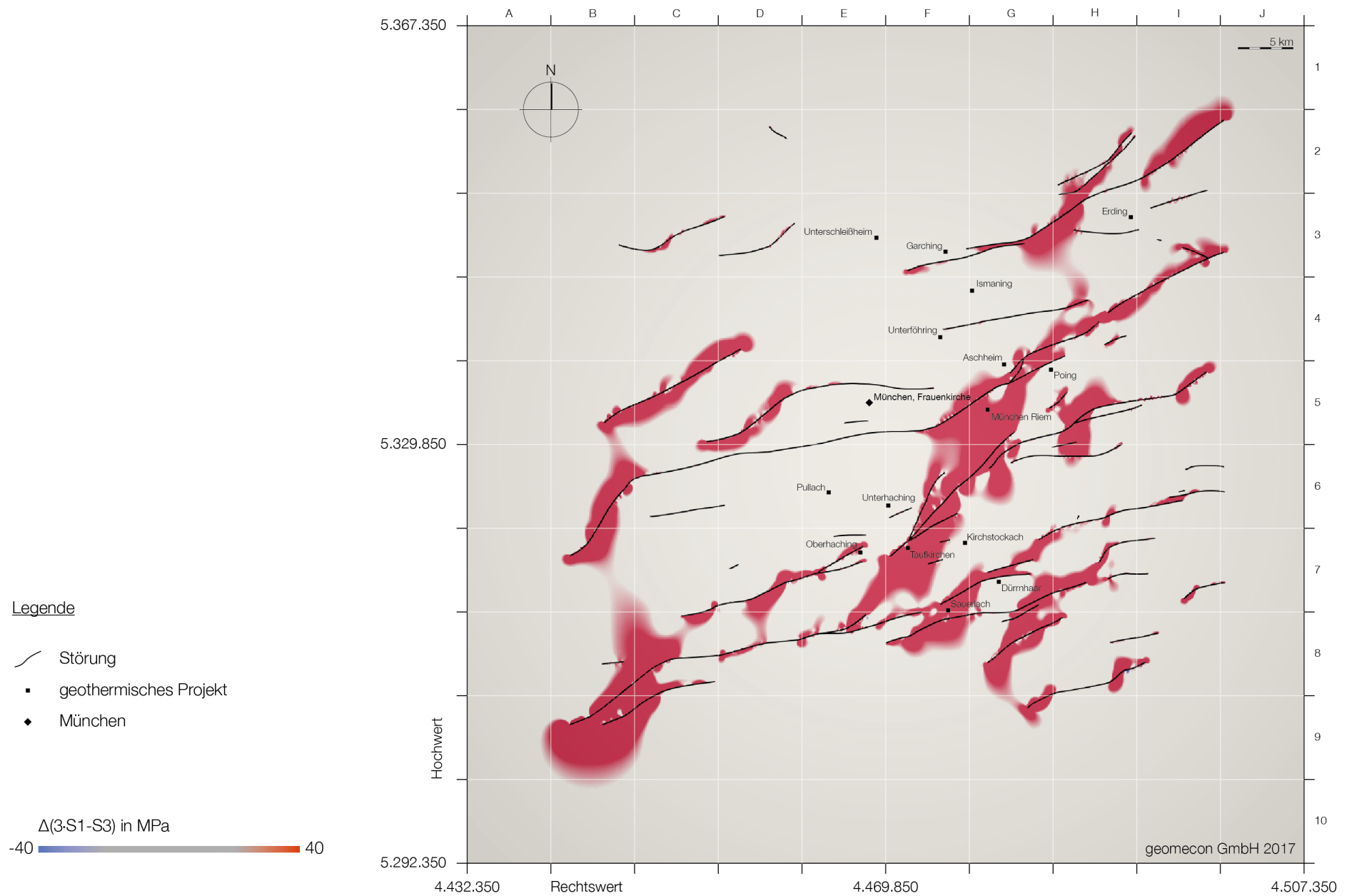


Veränderung der maximalen Tangentialspannung saigerer Bohrungen

Durch die Veränderung der Hauptnormalspannungen ist auch die Tangentialspannung, welche auf Bohrungen wirkt und die Stabilität der Bohrungen beim Teufen bestimmt, verändert. Es ist davon auszugehen, dass in Bereichen, in denen die Differenz zwischen den Hauptnormalspannungen größer ist, die Bohrungen tendenziell schwerer zu kontrollieren sind.

In der nebenstehenden Abbildung ist die maximale Tangentialspannung dargestellt. Die maximale Tangentialspannung kann als Maß für das Risiko kompressiven Versagens (Ausbrüche, Kollaps) verstanden werden. In Bohrungen, welche in den rot ausgewiesenen Bereichen geteuft werden, sind höhere Spülgewichte zu verwenden und das Risiko für Nachfall ist erhöht.

>> Darstellung der Veränderung der maximalen Tangentialspannung an vertikalen Bohrungen im Malm. Vom Simulationsergebnis mit Störungen wurde das Simulationsergebnis ohne Störungen subtrahiert, so dass nur die Veränderungen gegenüber dem subregionalen Spannungsfeld zu sehen sind. In den grauen Bereichen sind die Spannungen nur wenig bis gar nicht verändert, durch blau und rot sind Bereiche gekennzeichnet, in denen deutliche Veränderungen der maximalen Tangentialspannung an vertikalen Bohrungen zu erwarten ist.



Veränderung der minimalen Tangentialspannung saigerer Bohrungen

Durch die Veränderung der Hauptnormalspannungen ist auch die Tangentialspannung, welche auf Bohrungen wirkt und die Stabilität der Bohrungen beim Teufen bestimmt, verändert. Es ist davon auszugehen, dass in Bereichen, in denen die Differenz zwischen den Hauptnormalspannungen größer ist, tendenziell eher mit Spülungsverlusten zu rechnen ist.

In der nebenstehenden Abbildung ist die minimale Tangentialspannung dargestellt. Die minimale Tangentialspannung kann als Maß für das Risiko von Zugrisswachstum verstanden werden. In Bohrungen, welche in den blau ausgewiesenen Bereichen geteuft werden, sind eher geringere Spülungsgewichte zu verwenden und das Risiko für Spülungsverluste ist erhöht.

In Assets, in denen sowohl die minimale Tangentialspannung erniedrigt und die maximale Tangentialspannung erhöht ist (z.B. Planquadrat B9), sind die einsetzbaren Spülungsgewichte eher gering und daher ist das Teufen der Bohrungen eher risikobehaftet. Eine fundierte geomechanische Bohrungsstabilitätsanalyse ist in solchen Bereichen zu empfehlen.

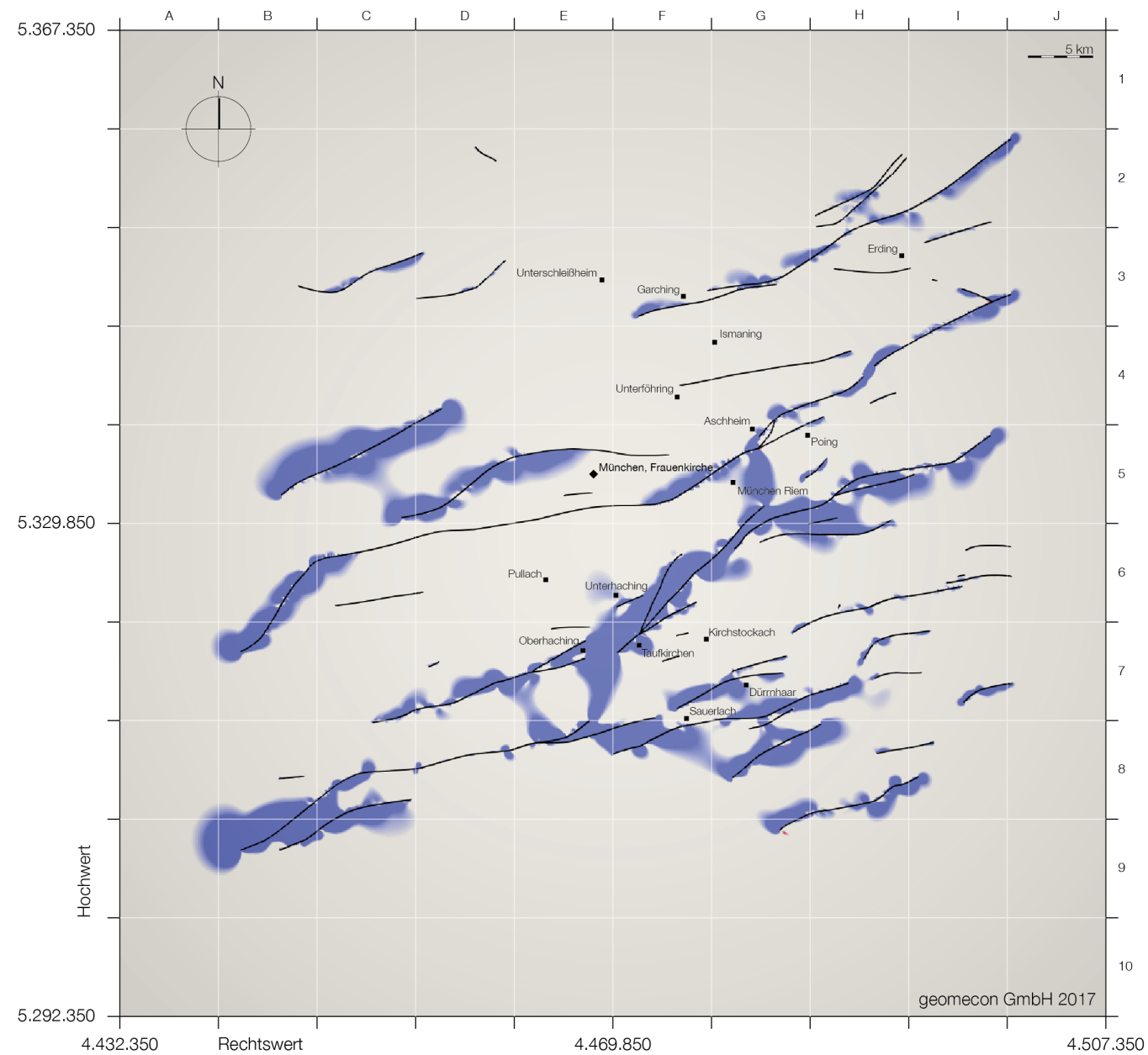
>> Darstellung der Veränderung der minimalen Tangentialspannung an vertikalen Bohrungen im Malm. Vom Simulationsergebnis mit Störungen wurde das Simulationsergebnis ohne Störungen subtrahiert, so dass nur die Veränderungen gegenüber dem regionalen Spannungsfeld zu sehen sind. In den grauen Bereichen sind die Spannungen nur wenig bis gar nicht verändert, durch blau und rot sind Bereiche gekennzeichnet, in denen deutliche Veränderungen der minimalen Tangentialspannung an vertikalen Bohrungen zu erwarten ist.

Legende

-  Störung
-  geothermisches Projekt
-  München

$\Delta(3-S3-S1)$ in MPa

-40  40



Schlussfolgerungen

Durch die geomechanische Analyse der Interaktion von Störungen mit subregionalem Spannungsfeld lassen sich lokale Alterationen der Spannungen an Störungen ableiten.

Es zeigt sich, dass in der bayrischen Molasse die störungsinduzierten Spannungsalterationen das existente Trennflächeninventar im Gebirge lokal mit erhöhter Scherbelastung beaufschlagen, was zu *tendenziell erhöhter Konduktivität* führen kann. Bereiche potentiell erhöhter Trennflächenkonduktivität liegen *im Bereich von Störungsenden* und -versätzen (siehe Oberhaching und Taufkirchen); dies deckt sich mit Beobachtungen von Faulds et al. (2012). Außerdem zeigen auch Gebirgsbereiche erhöhte Scherspannungen auf, die in der Phalanx von gestaffelten Störungen liegen.

Darüber hinaus lassen sich, mithilfe geomechanischer Simulationen der Spannungsalteration durch Störungen, nicht nur Indizien für *Bereiche erhöhter Höffigkeit* finden, sondern auch die Herausforderungen des Bohrungsteufens im Rahmen von Machbarkeitsstudien identifizieren. So zeigen speziell Bohrungen in einiger Entfernung zu Störungszonen ein *geringeres Risiko für Bohrungsinstabilitäten*.

Referenzen

Backers et al., 2017. Abschlussbericht zum Teilprojekt B: Struktur- und Spannungsfeld im Verbundprojekt MAFA: Parametrisierung von Fazies, Diagenese, Struktur- und Spannungsfeld sowie Optimierung der Testabläufe im Malm zur Verringerung des Erfolgsrisikos. Technische Informationsbibliothek (TIB) Hannover. (<https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A1002914078/>).

Bock, H., 1980. Das Fundamentale Kluftsystem. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Band 131, S. 627 - 650.

Faulds, J.E., Hinz, N., Kreemer, C., 2012. Structural and tectonic controls of geothermal activity in the basin and range province, western USA. New Zealand Geothermal Workshop 2012 Proceedings, 19-21 November 2012, Auckland, New Zealand.

Meier, T., Backers T., 2017. Thermo-hydro-mechanische Simulation des Reservoirverhaltens zur Abschätzung des Potenzials induzierter Seismizität bei Förderung und Injektion. ErdölErdgasKohle.

Munsch, P., 2017. Untersuchung des Einflusses von störungsinduzierten Spannungsumlagerungen auf die Trennflächengefüge im bayerischen Molassebecken für die geothermische Anwendung. Masterarbeit Technische Universität Berlin.

geomecon GmbH
solutions@geomecon.de
Chausseestraße 88, 10115 Berlin
www.geomecon.de