



Originally published as:

Reiter, K., Heidbach, O., Reinecker, J., Müller, B., Röckel, T. (2015): Spannungskarte Deutschland 2015. - *Erdöl Erdgas Kohle*, 131, 11, pp. 437–442.

# Spannungskarte Deutschland 2015

## Stress Map Germany 2015

Von K. REITER, O. HEIDBACH, J. REINECKER, B. MÜLLER und TH. RÖCKEL\*

### Abstract

Magnitude and orientation of present-day crustal stress field varies not only laterally and vertically, but also in time at some locations. Sources of stress anisotropy are long-lasting exogenic and endogenic processes, rheological and density variation in the crust as well as man-made changes due to underground excavation, drilling and reservoir production. Knowledge of the local stress tensor is fundamental for sub-surface operations in the Earth's crust and its sus-

tainable utilization. We present here the complete revision and extension of the German part of the World Stress Map database (WSM). By adding 224 data records of maximum horizontal stress ( $S_{Hmax}$ ) orientation, the database increased to a total of now 753 data records. The better spatial coverage showcases a clearer pattern of large-scale variation and regional trends. This enables to indicate and investigate local and regional stress variations (e. g. in the eastern part of the North-German Basin) which contradicts large-scale stress sources.  $S_{Hmax}$  orientations within the Central Uplands as well as in the eastern part of the North-German Basin are possibly overprinted by SW-NE and NW-SE respectively striking variscan basement structures.  $S_{Hmax}$  orientations in the Alpine Molasses Basin are perpendicular to the strike of the alpine front as a result of gravitational potential energy of the Alps.

### Kurzfassung

Magnituden und Orientierung des rezenten Spannungsfelds in der Erdkruste variieren lateral und vertikal, an manchen Lokationen auch temporär. Ursachen dafür sind die andauernden exogenen und endogenen Prozesse, die rheologische Struktur der Kruste und anthropogene Eingriffe in den Untergrund. Die Kenntnis des lokalen Spannungstensors ist grundlegend für operative Eingriffe in den geologischen Untergrund und dessen nachhaltigen Nutzung. In diesem Beitrag stellen wir die komplette Revision und Erweiterung der Datenbasis für Deutschland als Teil der Datenbank zur Weltspannungskarte (World Stress Map – WSM) vor. 224 neue Datensätze der Orientierung der maximalen horizontalen Spannung ( $S_{Hmax}$ ) erhöhen die Gesamtzahl auf nun 753 Einträge. Die räumlich höhere Auflösung der Daten ermöglicht es, ein klareres

\* Karsten Reiter, TU Darmstadt, Institut für Angewandte Geowissenschaften (E-Mail: Reiter@geo.tu-darmstadt.de); Oliver Heidbach, Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ; John Reinecker, GeoThermal Engineering GmbH, Karlsruhe; Birgit Müller, KIT-Institut für Angewandte Geowissenschaften, Karlsruhe; Thomas Röckel, Piewak & Partner, Ingenieurbüro für Hydrogeologie und Umweltschutz, Bayreuth.

Bild der großräumigen Variationen und Trends in den Spannungsorientierungen zu erlangen. Andererseits können Spannungsorientierungen in Regionen, die nicht dem groß-tektonischen Trend entsprechen (z. B. östlicher Teil des Norddeutschen Beckens), genauer untersucht werden, um die möglichen Ursachen für lokale bzw. regionale Spannungsfelder, die den großräumigen Trend überprägen, zu identifizieren. Die Spannungsorientierungen in der deutschen Mittelgebirgsschwelle sowie im östlichen Teil des Norddeutschen Beckens könnten z. B. durch die SW-NE beziehungsweise NW-SE streichenden variszischen Grundgebirgsstrukturen beeinflusst sein. Die Orientierung von  $S_{Hmax}$  in der Bayerischen Molasse ist senkrecht zum Streichen der Alpen Front, woraus wir schließen, dass diese vor allem vom Schwerkraftpotenzial der Alpen resultiert.

## 1 Einleitung

Ein gutes Verständnis des gegenwärtigen krustalen Spannungszustandes ist wichtig, um tektonische Prozesse und deren Folgen, wie zum Beispiel Erdbeben, besser zu verstehen. Bei der Nutzung der oberen Kruste sind komplexe Fragestellungen zur Standsicherheit von Untergrund-Einrichtungen, neben geomechanischen Kenngrößen, hauptsächlich vom Spannungszustand in der Erdkruste abhängig. Die unterschiedlichen Nutzungsarten sind die Förderung von fossilen und regenerativen Energieträgern (Erdöl, Erdgas, Kohle und Thermalwasser), Untertageeinrichtungen zur Förderung mineralischer Rohstoffe, die Nutzung als Endlager für (radioaktive) Abfälle oder als Erdgas- oder Druckluftspeicher [1]. Der Spannungszustand ist auch bereits in der Planungsphase eine wichtige Kenngröße mit Einfluss auf zukünftige Fließ- und Produktionsraten [2]. Weiterhin ist die Orientierung und Magnitude der kleinsten und größten Hauptspannungen, in Verbindung mit dem Spannungsregime, ein wichtiger Faktor im Falle notwendiger Reservoir-Stimulation [3]. Differenzspannungen im Untergrund haben großen Einfluss auf die Standsicherheit von Untergrundeinrichtungen, wie Bohrlöcher, Schächte, Tunnel oder Kavernen, sind in der Regel aber nur für wenige Jahre oder Jahrzehnte, maximal Jahrhunderte von Relevanz. Demgegenüber ist die notwendige Beurteilung der Langzeitsicherheit eines radioaktiven Endlagers über Zeiträume von mehreren hunderttausenden Jahren eine große Herausforderung, da hier z. B. über einen Störungsversatz der einschlusswirksame Gebirgsbereich beeinträchtigt werden kann. Auch Erosionsprozesse, die zur Exhumierung der Endlagerbehälter führen könnten, werden durch das Spannungsfeld mit beeinflusst. Der rezente Spannungszustand in der Erdkruste ist das Produkt der komplexen geologisch-tektonischen Geschichte, beeinflusst durch Prozesse von globaler, regionaler bis

lokaler Dimension [4–6]. Dazu zählen u. a. plattentektonische Bewegungen, Sedimentbeckengeometrie, strukturelle und materielle Inhomogenitäten wie Dichte- und Festigkeitskontraste oder Störungen, aber auch exogene Prozesse, wie Erosion und daraus folgende Massenumlagerungen oder postglazial-isostatische Ausgleichsbewegungen. Zusätzliche anthropogene Überprägungen erlangen im lokalen Maßstab eine wachsende Bedeutung. Da der In-situ-Spannungszustand die Summe all dieser verschiedenen Einflussgrößen ist, kann der Spannungszustand im Voraus nur sehr begrenzt abgeschätzt werden. Dies kann auf der Basis von beobachteten Deformationen bzw. Versagensprozessen erfolgen. Solche Spannungsindikatoren können an der Oberfläche, über Erdbebenanalysen und vor allem in Bohrlöchern beobachtet werden. Zur Minimierung des Bohrrisikos (Bohrlochstabilität) und induzierter Seismizität ist es hilfreich, bereits in der Planungsphase einer Bohrung die Orientierung des Spannungsfeldes, das Spannungsregime und idealerweise auch Spannungsmagnituden und deren räumliche Variabilität abschätzen zu können. Je nach Kenntnisstand und Komplexität des Vorhabens können geomechanisch-numerische Modelle eine gute Abschätzung ermöglichen. Die Verfügbarkeit von Daten zu Spannungsorientierungen und Spannungsmagnituden sind eine wichtige Datengrundlage, um Spannungsmodelle daran zu kalibrieren.

## 2 Tektonische Spannungen in der Erdkruste

Der Spannungstensor besteht aus neun Komponenten, wovon nur sechs aufgrund seiner Symmetrieeigenschaften voneinander unabhängig sind. Daher kann der Spannungszustand bei geeigneter Wahl des Referenzsystems durch drei zueinander orthogonal stehender Hauptspannungen beschrieben werden, welche dann in der Reihenfolge der Magnitudengröße  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  sind. Sind alle drei Hauptspannungen gleich groß, dann spricht man bei einem Fluid von hydrostatischem Druck; in der Lithosphäre nennt man diesen isotropen Zustand lithostatischen Druck mit  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ . Die Abweichung von diesem isotropen Zustand ist der deviatorische Anteil des Spannungstensors. Als tektonische Spannungen werden die Spannungen bezeichnet, die von einem Referenzzustand – z. B. dem lithostatischen Zustand – abweichen [7]. Für Gebiete, in denen lateral homogen-isotrope Eigenschaften bezüglich Dichte und mechanischer Gesteinseigenschaften angenommen werden können (z. B. in Sedimentbecken), wird angenommen, dass die Vertikalspannung ( $S_V$  – senkrecht zur Oberfläche) eine Hauptspannung ist (Abb. 1). Daraus folgt, dass es senkrecht dazu zwei horizontale Hauptspannungen gibt, welche als die minimale horizontale Spannung ( $S_{Hmin}$ )

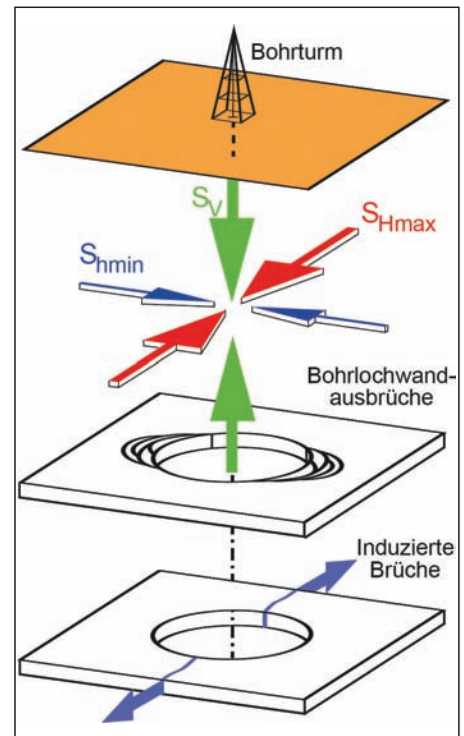


Abb. 1 Simplifizierte Annahme der Spannungsorientierung. Vor allem in Sedimentbecken mit geringer Topographie und lateral-homogenen Gesteinseigenschaften wird oft angenommen, dass die vertikale Spannung ( $S_V$ ) eine Hauptspannung ist. Senkrecht dazu stehen die minimale und die maximale horizontalen Hauptspannung ( $S_{Hmin}$  und  $S_{Hmax}$ ). In einem Blattverschiebungs- oder Abschiebungsregime entwickeln sich Bohrlöcherwandausbrüche parallel zur  $S_{Hmin}$ -Orientierung, während hydraulisch induzierte Risse in  $S_{Hmax}$ -Orientierung aufbrechen. Im Überschiebungsregime treten hydraulisch induzierte Risse horizontal auf, d. h. senkrecht zur kleinsten Hauptspannung ( $S_V = \sigma_3$ )

und die maximale horizontale Spannung ( $S_{Hmax}$ ) bezeichnet werden. Mit dieser Annahme reduziert sich die Anzahl der notwendigen Komponenten des Spannungstensors auf vier, der Orientierung von  $S_{Hmax}$  sowie der Magnituden von  $S_V$ ,  $S_{Hmax}$  und  $S_{Hmin}$ . Die Orientierung der maximalen horizontalen Spannung ( $S_{Hmax}$ ) wird in der World Stress Map (WSM)-Datenbank global gesammelt. Dabei werden international anerkannte Kriterien zur Analyse und Bewertung der Daten jeweils für die unterschiedlichen Spannungsindikatoren angewendet. Dies ermöglicht es, die Daten im Kontext lokaler und regionalgeologischer Zusammenhänge zu interpretieren und zu analysieren. Für angewandte Fragestellungen können die Daten direkt zur Vorhersage oder zur Modell-Kalibrierung genutzt werden. Weiterhin liegt für viele Datensätze in der WSM auch die Information zum Spannungsregime vor. Das relative Verhältnis der Spannungsmagnituden zueinander bestimmt, in welchem Spannungsregime sich das Gesteinsvolumen befindet (Abb. 2). Dies sind das Überschiebungsregime (thrust faulting) ( $S_{Hmax} > S_{Hmin} > S_V$ ), Blattverschiebungsregime (strike-slip) ( $S_{Hmax} > S_V >$

$S_{hmin}$ ) und Abschiebungsregime (normal faulting) ( $S_V > S_{Hmax} > S_{hmin}$ ).

Das Spannungsregime hat entscheidenden Einfluss auf die Entstehung von hydraulisch induzierten Zugrisse, wenn das Reservoir (Erdöl, Erdgas oder Geothermie) aufgrund einer zu geringen Permeabilität stimuliert werden muss. Solche Zugrisse öffnen sich senkrecht zur kleinsten Hauptspannung ( $\sigma_3$ ) [3]. Wenn günstig orientierte Schwächezonen vorhanden sind, können diese wegen der deutlich geringeren Kohäsion bevorzugt aufbrechen. Im Überschiebungsregime entstehen horizontale Zugrisse ( $S_V = \sigma_3$ ), während im Blattverschiebungsregime als auch beim Abschiebungsregime die Zugrisse vertikal, jeweils senkrecht zu  $S_{hmin}$  ( $S_{hmin} = \sigma_3$ ) stehen, also parallel der Orientierung von  $S_{Hmax}$  entstehen.

Bohrlochwandausbrüche sind Scherbrüche infolge von Spannungsspitzen, welche parallel zur Orientierung von  $S_{hmin}$  entstehen [8]. Dabei brechen beiderseits Gesteinsplitter heraus, sodass ein elliptischer Bohrlochquerschnitt entsteht. Diese Bohrlochwandausbrüche sind wichtige Indikatoren der  $S_{Hmax}$ -Orientierung [9]. Unabhängig von der bestimmbar Orientierung sind sie ein Indikator, dass die bruchnotwendigen Differenzspannungen zwischen  $S_{Hmax}$  und  $S_{hmin}$  erreicht wurden. Je höher die Differenzspannungen sind, umso mehr gefährdet ist die Stabilität des Bohrloches, in Abhängigkeit von den Gesteinseigenschaften. Somit ermöglicht ein gutes Verständnis von Orientierung und Magnitude des Spannungsfeldes, standsicherheitsoptimierte Bohrpfade zu planen [10].

Die Hauptantriebskräfte der krustalen Spannungen sind sehr eng mit den plattentektonischen Bewegungen verbunden. Zu diesen tektonischen Spannungsquellen zählen der Schub durch Mittelzoanische Rücken, der Zugkräfte entlang von Subduktionszonen und basale Reibung an der Basis der Lithosphäre [11]. Dazu kommt die räumliche Variation der Dichteverteilung im Erdschwerefeld, die unter Umständen auch als Indikator der  $S_{Hmax}$ -Orientierung genutzt werden kann [12]. Weitere Einflussgrößen zweiter und dritter Ordnung, wie Biegung durch Auflast, isostatische Ausgleichsbewegungen nach Auflaständerungen etc. haben im regionalen und lokalen Maßstab einen unterschiedlich großen Einfluss [4, 5, 13].

### 3 Das World Stress Map (WSM)-Projekt

Krustale Spannungsdaten von verschiedenen Spannungsindikatoren werden seit den 1970'er Jahren kompiliert [14], dazu zählten Herdflächenlösungen, das Überbohrverfahren (Overcoring), hydraulisch induzierte Zugrisse (Hydraulic fracturing) sowie geologische Indikatoren [15, 16]. Nachdem erkannt wurde, dass Bohrlochwandausbrüche auch ein Indikator für die horizontale Spannungsorientierung sind [9, 16], stand ein deutlich größeres Datenpotenzial zur

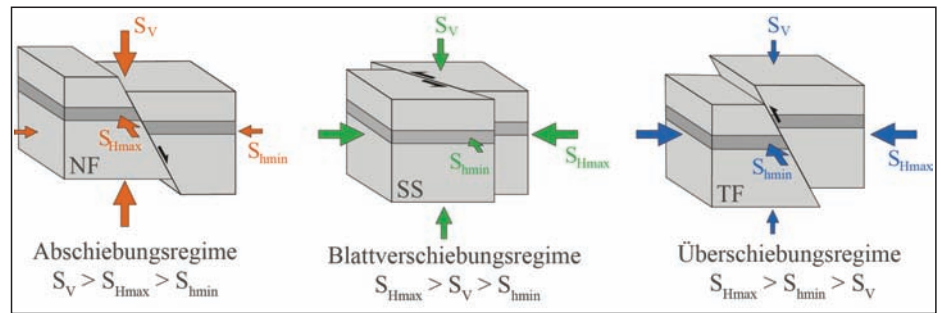


Abb. 2 Es gibt drei mögliche Grundarten von Spannungsregimes: Abschiebungsregime, Blattverschiebungsregime und Überschiebungsregime. Zwischen Abschiebung und Blattverschiebung sowie zwischen Blattverschiebung und Überschiebung sind alle Mischformen möglich

Verfügung. Es ermöglichte in manchen Regionen, schrittweise das Verständnis von Spannungsmustern, als auch deren Ursachen besser zu verstehen. Dies führte im Rahmen des internationalen Lithosphären-Programms 1986 zur Gründung der World Stress Map (WSM)-Datenbank [4, 11, 18]. Bereits die erste globale WSM-Publikation umfasste ca. 7.700 Einträge [4]. In den Folgejahren gab es eine schrittweise Steigerung der Einträge, bis zur letzten globalen Aktualisierung von 2008 mit 21.750 Einträgen [18]. Flankierend dazu gab es immer wieder regional begrenzte Aktualisierungen der Datenbank [19]. Die Datenbank umfasst Spannungsorientierungen, abgeleitet von einzelnen Herdflächenlösungen (FMS), gemittelte Herdflächenlösungen (FMA) sowie die Spannungsinversion von Herdflächenlösungen (FMF), Bohrlochdaten, wie Bohrlochwandausbrüche (BO, BOT, BOC), hydraulisch induzierte Zugrisse (HF, HFG, HFM, HFP), bohrungsinduzierte Zugrisse (DIF), Overcoring (OC) sowie sehr junge geologische Indikatoren (Orientierungen vulkanischer Gänge, Versatz an Störungen). All diese Spannungsindikatoren reflektieren die (sub-)rezente Orientierung des Spannungsfeldes in der Erdkruste.

Ein wesentliches Merkmal der WSM ist die Zuordnung von Qualitäten der Daten in Bezug auf ihre Aussagekraft zum tektonischen Spannungsfeld. Die Qualität wird z. B. durch die Anzahl, Länge und Homogenität der Spannungsindikatoren, wie Bohrlochwandausbrüche entlang einer Bohrung in die Tiefe bestimmt. Manche Methoden repräsentieren nur ein sehr kleines Gesteinsvolumen, bestimmen dieses aber recht genau und detailliert (z. B. Overcoring), während andere Methoden aufgrund ihrer weniger eindeutigen Beziehung zum Spannungsfeld ungenauer sind, aber repräsentativ für deutlich größere Gesteinsvolumina sind, wie z. B. Herdflächenlösungen. Die Qualitätskriterien reichen von A bis E, wobei die A-Qualität bedeutet, dass der Datenpunkt die  $S_{Hmax}$ -Orientierung mit  $\pm 15^\circ$  zuverlässig angegeben ist, B-Qualität mit  $\pm 20^\circ$ , C-Qualität mit  $\pm 25^\circ$  und D-Qualität mit  $\pm 40^\circ$ . Datensätze mit E-Qualität beinhalten mehrdeutige bzw. schlecht verwertbare Information. Aufgrund oft auftretender Missverständnisse, muss klar darauf hingewiesen werden,

dass in der WSM bisher nur die Orientierungsdaten systematisch zusammenstellt werden und keine Bewertung der zum Teil vorliegenden Informationen von Spannungsmagnituden vorgenommen wird.

## 4 Aktualisierung der Spannungskarte Deutschland

Das Zusammenstellen von Spannungsdaten aus der Erdkruste hat in Deutschland eine lange Tradition. So wurden Daten vom Überbohrverfahren [20] oder Herdflächenlösungen [21] bereits vor mehreren Jahrzehnten im regional-tektonischen Kontext krustaler Spannungen untersucht und interpretiert. Als Hauptursache wurde die Konvergenz der Europäischen und der Adriatischen Platte sowie Divergenz des Nordatlantischen Rückens identifiziert [4, 22–24]. Der Großteil der deutschen Daten wurde während der Entstehungsphase der WSM der Datenbank hinzugefügt [4, 22, 23]. In den Folgejahren wurden die Spannungsmuster in Deutschland in lokalen und überregionalen Studien untersucht. Dazu zählen Publikationen über das Norddeutsche Becken [5, 25–27] oder Arbeiten über Spannungsmuster im süddeutschen Molasse Becken [19] und dem Oberrheingraben [28]. Großräumige Untersuchungen nutzen in der Regel abstrakte geomechanisch-numerische Modelle [22, 24, 30, 39]. Dabei waren die vorhandenen Spannungsdaten wichtige Informationen, um die Modelle kalibrieren zu können. Unabhängig davon, ob die Daten direkt für Analysen oder zur Kalibrierung von Modellen genutzt werden, ist eine Erhöhung der Datenbasis ein wichtiger Baustein zu einem verbesserten akademischen Verständnis, aber auch um geotechnische Investitionen im Untergrund besser absichern zu können.

Für die vorliegende Aktualisierung der neuen deutschen Spannungskarte wurden die 529 Datensätze aus der WSM-Datenbank-Veröffentlichung von 2008 [31] überprüft und an 371 Datensätzen Korrekturen oder Ergänzungen vorgenommen. Dies ist bedingt durch neu verfügbare Informationen sowie durch die konsequente Umsetzung der aktuellsten WSM-Qualitätskriterien [31]. So mussten Herdflächenlösungen offensichtlicher Nachbeben in der Qualität herab-



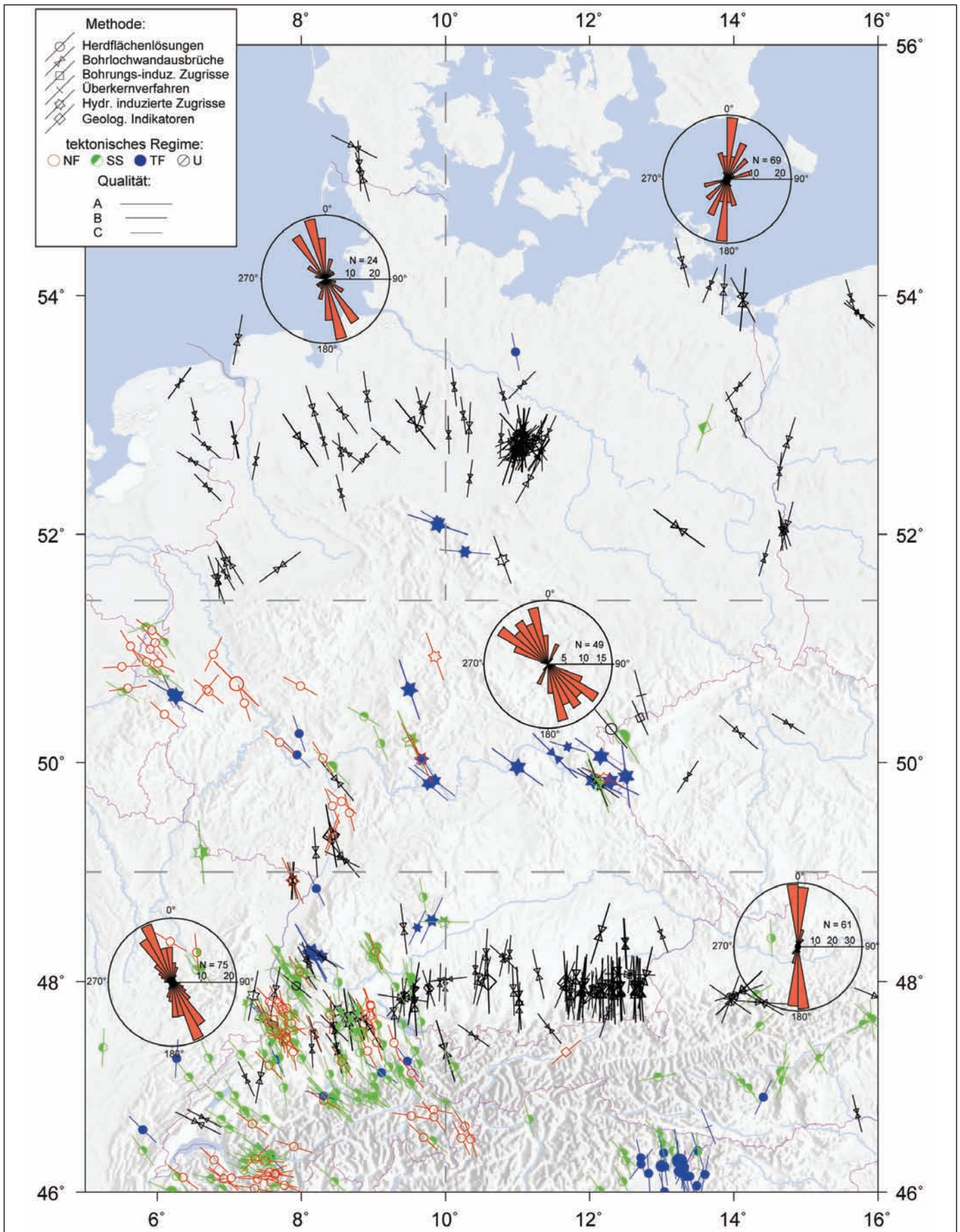


Abb. 3 Spannungsorientierungskarte von Deutschland und angrenzenden Regionen mit Spannungsindikatoren der Qualitäten A bis C. Die Methode der Spannungsindikatoren ist mit einem Symbol (siehe Legende) gekennzeichnet. Das Spannungsregime ist farblich gekennzeichnet: Rot – Abschiebung, Grün – Blattverschiebung, Blau – Überschiebung und Schwarz – unbekanntes Regime. Die Verteilung der 278 A–C-Orientierungsdaten aus Deutschland ist zusätzlich durch fünf Rosen-Diagramme dargestellt. Dabei ist die Region entlang der Breitengrade 49° und 51,5° sowie durch den 10. Längengrad im Norden und Süden in fünf Unterregionen untergegliedert (gestrichelte Linien)

gestuft werden (z. B. Albstadt und Braunweiler). Zusätzlich wurden 224 neue Einträge aus einer umfangreichen Literaturrecherche hinzugefügt. Nicht eingerechnet sind die 80 Datensätze, die für das Gebiet der Schweiz im Zusammenhang mit begleitenden Projekten ergänzt werden konnten. Vor allem in den Bundesländern Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg konnte die Datendichte erheblich verbessert werden. Abbildung 3 zeigt die Spannungskarte von Deutschland mit Qualitäten von A bis C. Dabei werden aber nur etwa 37 % der Daten dargestellt, da nahezu 2/3 der Daten nur D und E-Qualität besitzen (Abb. 4 a). Mehr als die Hälfte der Daten sind Indikatoren von Bohrlochwandausbrüchen (BO), gefolgt von Herdflächenlösungen (FM), hydraulisch induzierten Zugrissen (HF) und Overcoring (OC), siehe Abbildung 4 b.

## 5 Spannungsmuster in Deutschland

Die beobachteten Orientierungen von  $S_{Hmax}$  in Deutschland liegen im Mittel bei NNW–SSE ( $169^\circ \pm 31^\circ$  für A- bis C-Qualitäten), was etwa der kinematischen Konvergenz zwischen der Adriatischen Platte und dem Nordatlantischen Rücken entspricht. Das Spannungsmuster ist aber deutlich komplexer, so kann z. B. eine uhrzeigersinnliche Rotation im östlichen Norddeutschen Becken von NNW–SSE nach NNE–SSW beobachtet werden (Abb. 3). Lokale Studien und Modelle legen nahe, dass Inhomogenitäten innerhalb West- und Zentraleuropas deutlich größeren Einfluss auf die Spannungsorientierung haben können [19–24, 28, 31, 33]. Im Folgenden werden die Beobachtungen der Spannungsorientierungen für einige Regionen ausführlicher diskutiert.

### 5.1 Süddeutsches Molassebecken

Im süddeutschen Molassebecken ist eine graduelle Rotation der  $S_{Hmax}$ -Orientierung um ca.  $40^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn von N–S im Osten nach NW–SE im Westen bis zum Bodensee zu beobachten [19]. Diese Rotation folgt einerseits dem Streichen der Alpentopographie, aber auch dem Trend der Krustenmächtigkeit der Region. Dies impliziert, dass diese Orientierung wahrscheinlich stärker durch die Krustenstruktur inklusive Alpentopografie überprägt wird als von den Plattenrandkräften. Diese kalte, dichte und langsam absinkende Krustenwurzel ist eine negative Schwerkraftanomalie und verursacht kompressive Spannungen senkrecht zu Anomalie [19, 23].

### 5.2 Oberrheingraben

Direkt im Oberrheingraben (ORG) werden  $S_{Hmax}$ -Orientierungen zwischen N–S und NNW–SSE beobachtet. Entlang der Grabenschultern (Vogesen, Schwarzwald und Odenwald) ist eine NW–SE orientierte Kompression zu beobachten, was dem trans-tensiv bis transpressiven Zustand der Region entspricht. Dies wird auch durch Herdflä-

chenlösungen bestätigt, die eine Mischung aus Blattverschiebungsregime und Abschiebungsregime aufzeigen [23]. Eine Entkopplung zwischen dem Grundgebirge und der Sedimentfüllung kann im ORG nicht nachgewiesen werden [29].

### 5.3 Deutsche Mittelgebirgsschwelle

Offensichtlich ist auch ein deutlicher Trend von NW–SE orientierten  $S_{Hmax}$  im Bereich zwischen dem  $49.$  und  $51,5.$  Breitengrad, von der Eifel im Westen bis hin zur Böhmisches Masse im Osten zu beobachten, was größtenteils der Deutschen Mittelgebirgsschwelle sowie Teilen der Süddeutschen Schichtstufenlandschaft entspricht. Dieser Trend scheint unabhängig zwischen dem Norddeutschen Becken und der Süddeutschen Molasse eingelagert zu sein (Abb. 3, mittleres Rosendiagramm). Die Abweichung im Bereich der Deutschen Mittelgebirgsschwelle beträgt etwa einer Rotation von  $20^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn. Diese Orientierung liegt überraschenderweise genau orthogonal zu den variszischen Grundgebirgsstrukturen, welche hier NE–SW streichen [32]. Möglicherweise sind hier die Spannungsorientierungen mehr durch die regionalen Grundgebirgsstrukturen geprägt als durch die globalen Plattenrandkräfte.

### 5.4 Norddeutsches Becken und Nord-Ost-Grenze der Westeuropäischen Plattform

Im westlichen Teil des Norddeutschen Beckens ist eine Orientierung zwischen NW–SE und NNW–SSE in den Sub-Zechstein Einheiten zu beobachten, was der generellen Konvergenz zwischen den tektonischen Platten entspricht. Weiter nach Osten rotiert diese Orientierung im Uhrzeigersinn um etwa  $40^\circ$  zu einer NNE–SSW-Orientierung [22, 26, 27]. Diese Trendänderung im Norddeutschen Becken liegt etwa beim  $10.$  Längengrad. Auch diese abweichende Orientierung im Osten ist orthogonal zum Trend der variszischen Grundgebirgsstrukturen weiter südlich, welche NW–SE verlaufen [32]. Auch dort, z. B. in der Lausitz werden solche Spannungsorientierungen beobachtet.

Diese Spannungsrotation konnte durch die Implementierung der Tornquist-Tesseire-Zone (TTZ) als Modellrand, aber auch als Steifigkeitskontrast im Übergang zur Osteuropäischen Plattform in Modellen reproduziert werden [22, 30, 34, 35]. Diese Rotation kann aber auch durch die Änderung der Krustenmächtigkeit, senkrecht zu TTZ von 30 km im Norddeutschen Becken bis zu 40 km im Polnischen Tiefland erklärt werden. Weiterhin wird ein unterschiedlicher Versatz entlang der TTZ diskutiert [13]. Zusätzlich wird der Einfluss durch die post-glazialen Krustenhebung (isostatic rebound) diskutiert [35, 36].

Die Zechstein-Evaporite im Norddeutschen Becken bewirken ein Entkoppeln der Spannungsorientierungen in den supra-salinaren Einheiten von den sub-salinaren Einheiten.

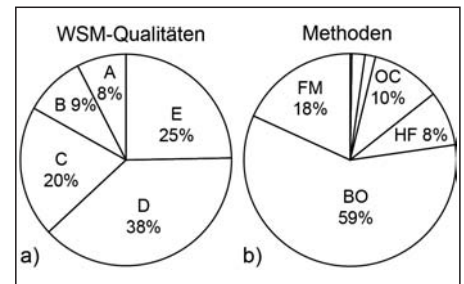


Abb. 4 Verteilung der Daten: a) Darstellung der Verteilung nach den Datenqualitäten A–D, wobei A die höchste und E die niedrigste Qualität ist. b) Anteile der Methoden am Datensatz; Herdflächenlösungen (FM), Bohrlochwandausbrüche (BO), hydraulisch induzierte Zugrisse (HF), Overcoring (OC) sowie 5 % andere Verfahren

Während die Orientierungen in den sub-salinaren Einheiten dem großräumigen Trend entsprechen [26], werden die Spannungen in den supra-salinaren Einheiten hauptsächlich von den lokalen Strukturen bestimmt [26, 27, 37]. Dazu zählt neben der Topographie auch der Dichtekontrast um die Salzstöcke, welcher zur Rotation der Hauptspannung, aber auch zu Änderungen der Spannungsmagnituden führen kann [38]. Auch andere kriechfähige Sedimente, wie Tone oder Kohlen verursachen neben den Evaporiten nichtlineare Spannungsmuster in dieser Region [37].

## 6 Geomechanisch-numerische Modellierungsverfahren

Interpolationsverfahren [31] oder andere Glättungsalgorithmen bieten die Möglichkeit, die Orientierung von  $S_{Hmax}$  an beliebigen Lokationen vorherzusagen. Solche Verfahren können aber nicht verwendet werden, wenn die Datendichte inhomogen ist und strukturelle oder stoffliche Inhomogenitäten (Störungen, Material- bzw. Dichtekontrast, z. B. wie bei einem Salzstock) das Spannungsfeld lokal beeinflussen. Grundsätzlich fehlt eine Datenkompilation, um die fundamental wichtigen Daten zu Spannungsmagnituden zu interpolieren. Auch eine punktuelle Kompilation der vorhandenen Magnitudendaten von  $S_{Hmin}$  und die Zusammenstellung der  $S_V$ -Magnituden wird nicht ausreichen, um über Interpolationsverfahren den Spannungstensor und dessen räumliche Variabilität abzubilden. Großräumig kann dies nur mit 3D-geomechanisch-numerischen Modellen geleistet werden, da man damit die Möglichkeit hat, strukturelle und stoffliche Inhomogenitäten im Modell adäquat abzubilden.

Viele Untersuchungen nutzen geomechanisch-numerische Modelle unter Verwendung der Finiten Elemente Methode (FEM), um im überregionalen Maßstab die Ursachen für die beobachteten Spannungsmuster zu simulieren [22, 24, 30, 39, 41]. Zahlreiche Modelle fokussierten auf das ökonomisch interessante Norddeutsche Becken oder den Oberrheingraben [28]. Trotzdem



gibt es bisher kein 3D-geomechanisch-numerisches Modell, welches die Wechselwirkungen von globaler Tektonik, regionalen Strukturen und lokalen Spannungseinflüssen für Deutschland großräumig darstellt. Entscheidend für die Belastbarkeit der Modellergebnisse ist die Qualität des Kalibrierungsprozesses eines solchen Modells, bzw. die Quantifizierung der Modellunsicherheiten. Zur Kalibrierung werden Daten der Spannungsorientierung sowie der Magnitude von  $S_{Hmax}$  und  $S_{Hmin}$  benötigt. Leider stehen in der Regel für lokale Modelle nur relativ wenige Spannungsdaten zur Verfügung [40]. Eine größere Datenmenge ist derzeit nur für großräumige Modelle verfügbar [41].

## 7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das kontinuierliche Zusammenstellen von Spannungsorientierungsdaten unterstützt die Analyse des Spannungszustandes bereits in der Planungsphase potentieller Untergroundnutzungen. Die Überarbeitung aller verfügbaren Daten des deutschen Anteils der World Stress Map-Datenbank und die Erhöhung der Datensätze von 529 auf 753 ist ein wichtiger Schritt hin zur besseren Beschreibung der räumlichen Variabilität des Spannungsfeldes. Allerdings geben Informationen über die Orientierung von  $S_{Hmax}$  und des Spannungsregimes nur ein Teil der notwendigen Informationen über den Spannungstensor wieder. Daher ist eine konsequente Ausweitung der Kompilation auch auf Daten der Spannungsmagnituden notwendig. Diese Daten können als fundamentale Grundlage dienen, um ein 3D-geomechanisch-numerisches Modell Deutschlands zu kalibrieren. Mit einem solchen Modell wäre eine geologisch-physikalisch basierte »Interpolation« zwischen den Punktdaten möglich, um eine vollständige und kontinuierliche Beschreibung des Spannungstensors zu erhalten. Obwohl die methodischen Konzepte als auch die Rechenleistung sind heutzutage vorhanden, um diese Herausforderung zu bewältigen.

### Literatur

- [1] K. Fuchs and B. Müller: World Stress Map of the Earth: A key to tectonic processes and technological applications. *Naturwissenschaften*, 88, (9), 357–371, (2001).
- [2] J. S. Bell and P. J. McLellan: Exploration and production implications of subsurface rock stresses in western Canada. In: *Proceedings of the Oil and Gas Forum*, 1–5 (1995).
- [3] M. K. Hubbert and D. G. Willis: Mechanics of hydraulic fracturing. *AIME Pet. Trans.*, 210, 153–168, (1957).
- [4] M. L. Zoback: First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project. *J. Geophys. Res.*, 97, (B8), 11703–11728, (1992).
- [5] O. Heidbach, J. Reinecker, M. R. P. Tingay, B. Müller, B. Sperner, K. Fuchs, and F. Wenzel: Plate boundary forces are not enough: Second- and third-order stress patterns highlighted in the World Stress Map database. *Tectonics*, 26, (6), 1–19, (2007).
- [6] M. R. Tingay, B. Müller, J. Reinecker, O. Heidbach, F. Wenzel and P. Fleckenstein: Understanding tectonic stress in the oil patch: The World Stress Map Project. *Lead. Edge*, 24, (12), 1276–1282, (2005).
- [7] T. Engelder: *Stress regimes in the lithosphere*. Princeton University Press, (1992).
- [8] M. D. Zoback, D. Moos, L. Mastin and R. N. Anderson: Well bore breakouts and in situ stress. *Journal of Geophysical Research*, 90, (B7), 5523–5530, (1985).
- [9] J. S. Bell and D. I. Gough: Northeast-southwest compressive stress in Alberta evidence from oil wells. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 45, (2), 475–482, (1979).
- [10] D. R. Schmitt, C. A. Currie and L. Zhang: Crustal stress determination from boreholes and rock cores: Fundamental principles. *Tectonophysics*, 580, 1–26, (2012).
- [11] M. D. Zoback, M. L. Zoback, J. Adams, M. Assumpção, J. S. Bell, E. A. Bergman, P. Blümling, N. R. Brereton, D. Denham, J. Ding, K. Fuchs, N. Gay, S. Gregersen, H. K. Gupta, A. Gvishiani, K. Jacob, R. Klein, P. Knoll, M. Magee, J. L. Mercier, B. C. Müller, C. Paquin, K. Rajendran, O. Stephansson, G. Suarez, M. Suter, A. Udias, Z. H. Xu and M. Zhizhin: Global patterns of tectonic stress. *Nature*, 341, (6240), 291–298, (1989).
- [12] A. Ghosh, W. E. Holt and L. M. Flesch: Contribution of gravitational potential energy differences to the global stress field. *Geophys. J. Int.*, 179, (2), 787–812, (2009).
- [13] M. R. Tingay, B. Müller, J. Reinecker and O. Heidbach: State and origin of the present-day stress field in sedimentary basins: New results from the World Stress Map Project. In: *Golden Rocks 2006, The 41st U.S. Symposium on Rock Mechanics*, 1–14, (2006).
- [14] M. L. Sbar and L. R. Sykes: Contemporary Compressive Stress and Seismicity in Eastern North America: An Example of Intra-Plate Tectonics. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 84, (6), 1861–1882, (1973).
- [15] C. Ljunggren, Y. Chang, T. Janson and R. Christianson: An overview of rock stress measurement methods. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 40, (7–8), 975–989, (2003).
- [16] J. S. Bell: In situ stresses in sedimentary rocks (part 1): Measurement techniques. *Geosci. Canada*, 23, (2), 85–100, (1996).
- [17] M. D. Zoback and M. L. Zoback: Tectonic stress field of North America and relative plate motions. In: *Neotectonics of North America*, D. B. Slemmons and E. R. Engdahl, Eds. *Geological Society of America*, 339–366, (1991).
- [18] O. Heidbach, M. R. Tingay, A. Barth, J. Reinecker, D. Kurfeß and B. Müller: The World Stress Map Based on the Database Release 2008, equatorial scale 1:46,000,000. (2009).
- [19] J. Reinecker, M. R. Tingay, B. Müller and O. Heidbach: Present-day stress orientation in the Molasse Basin. *Tectonophysics*, 482, (1–4), 129–138, (2010).
- [20] G. Greiner: In-situ stress measurements in Southwest Germany. *Tectonophysics*, 29, (1–4), 265–274, (1975).
- [21] G. Schneider, R. Schick and H. Berckhemer: Fault-plane solutions of earthquakes in Baden-Württemberg. *Tectonophysics*, 4, (3), 281–293, (1967).
- [22] G. Grünthal and D. Stromeyer: The recent crustal stress field in central Europe: Trajectories and finite element modeling. *Journal of Geophysical Research*, 97, (B8), 11805–11820, (1992).
- [23] B. Müller, M. L. Zoback, K. Fuchs, L. Mastin, S. Gregersen, N. Pavoni, O. Stephansson and C. Ljunggren: Regional patterns of tectonic stress in Europe. *J. Geophys. Res.*, 97, (B8), 11783–11803, (1992).
- [24] G. Grünthal and D. Stromeyer: Stress pattern in Central Europe and adjacent areas. *Gerlands-Beitr. Geophys.*, 95, (5), 443–452, (1986).
- [25] R. Grote: Die recente horizontale Hauptspannungsrichtung im Rotliegenden und Oberkarbon in Norddeutschland. *ERDÖL ERDGAS KOHLE* 114, (10), 478–483, (1998).
- [26] T. Röckel and C. Lempp: Der Spannungszustand im Norddeutschen Becken – The state of stress in the North German Basin. *ERDÖL ERDGAS KOHLE*, 119, (2), 73–80, (2003).
- [27] F. Roth and P. Fleckenstein: Stress orientations found in north-east Germany differ from the West European trend. *Terra Nov.*, 13, (4), 289–296, (2001).
- [28] T. J. Buchmann and P. T. Connolly: Contemporary kinematics of the Upper Rhine Graben: A 3D finite element approach. *Glob. Planet. Change*, 58, (1–4), 287–309, (2007).
- [29] C. Lempp, M. Witthaus, T. Röckel, C. Hecht and M. Herold: Geomechanical behaviour of pelitic rocks with diagenetically caused different strengths becoming effective in deep geothermal boreholes. *Zeitschrift der Dtsch. Gesellschaft für Geowissenschaften*, 161, (4), 379–400, (2010).
- [30] G. Grünthal and D. Stromeyer: The recent crustal stress field in central Europe sensu lato and its quantitative modeling. *Geol. en Mijnb.*, 73, 173–180, (1994).
- [31] O. Heidbach, M. R. Tingay, A. Barth, J. Reinecker, D. Kurfeß and B. Müller: Global crustal stress pattern based on the World Stress Map database release 2008. *Tectonophysics*, 482, (1–4), 3–15, (2010).
- [32] W. Franke: Tectonostratigraphic units in the Variscan belt of central Europe. *Spec. Pap.*, 230, 67–90, (1989).
- [33] A. M. Marotta, U. Bayer, M. Scheck and H. Thybo: The stress field below the NE German Basin: Effects induced by the Alpine collision. *Geophys. J. Int.*, 144, (2), 8–12, (2001).
- [34] A. M. Marotta, U. Bayer, H. Thybo and M. Scheck: Origin of the regional stress in the North German basin: Results from numerical modeling. *Tectonophysics*, 360, (1–4), 245–264, (2002).
- [35] A. M. Marotta and R. Sabadini: The signatures of tectonics and glacial isostatic adjustment revealed by the strain rate in Europe. *Geophys. J. Int.*, 157, (2), 865–870, (2004).
- [36] C. Brandes, H. Steffen, R. Steffen and P. Wu: Intraplate seismicity in northern Central Europe is induced by the last glaciation. *Geology*, 43, (7), 611–614, (2015).
- [37] F. H. Cornet and T. Röckel: Vertical stress profiles and the significance of 'stress decoupling'. *Tectonophysics*, 581, 193–205, (2012).
- [38] M. A. Nikolainakou, P. B. Flemings and M. R. Hudec: Modeling stress evolution around a rising salt diapir. *Mar. Pet. Geol.*, 51, 230–238, (2014).
- [39] M. Jarosiński, F. Beekman, G. Bada and S. Cloetingh: Redistribution of recent collision push and ridge push in Central Europe: Insights from FEM modeling. *Geophys. J. Int.*, 167, (2), 860–880, (2006).
- [40] K. Fischer and A. Henk: A workflow for building and calibrating 3-D geomechanical models – A case study for a gas reservoir in the North German Basin. *Solid Earth*, 4, (2), 347–355, (2013).
- [41] K. Reiter and O. Heidbach: 3-D geomechanical-numerical model of the contemporary crustal stress state in the Alberta Basin (Canada). *Solid Earth*, 5, (2), 1123–1149, (2014).