

Der Spannungszustand im Norddeutschen Becken

The State of Stress in the North German Basin

Von TH. RÖCKEL und CHR. LEMPP*

Abstract

Stress indications from boreholes and wells from the North German Basin (NGB) were compiled in order to describe the actual state of stress in terms of stress directions and stress gradients. Published data [1, 2], as well as new evaluations gained from the eastern part of the basin, result in a uniform stress pattern: Different states of stress are established in the three layers of the sedimentary basin, in the suprasalinar (Triassic and younger sediments), the salinar (Zechstein) and the subsalinar (lower Permian and older sediments and crystalline rocks resp.).

Apparently, a mostly mechanical decoupling between the three layers is due to the salinar rocks with their isotropic state of stress. Both the horizontal stress directions and the stress gradients differ significantly in the three layers.

The overlying suprasalinar shows different directions of maximum horizontal stress component scattering around an E–W orientation and with amounts of minimal stress both lower and higher than vertical stress component. The salinar layer in the middle has an isotropic stress orientation without any horizontal or vertical preference and with lithostatic amounts or gradients of stress. The underlying subsalinar shows a strong N–S direction of maximum horizontal stress component in the central part of the NGB with small deviations to NNW–SSE in the western part and to NNE–SSW in the eastern part.

However, the effective gradient of the minimum horizontal stress component shows very uniform amounts of about 13 MPa/km. Nevertheless, in regions with reduced thickness of salinar layer or with dominant faults, a remarkable modification of the state of stress is to be expected. In terms of an actually effective tectonic regime, the state of stress in the NGB is characterized as a normal faulting state with E–W extension in the

subsalinar layer. As a rule, the amount of the vertical stress component is higher than the minimum horizontal stress component and there are no indications that the maximum horizontal stress component exceeds the vertical stress in the subsalinar layer. At the same time, the less dense and buoyant salinar sequences modify the state of stress in the uppermost suprasalinar sediments. As a result we find a descending basin with remarkable Quaternary thicknesses.

Kurzfassung

Im Bereich des norddeutschen Beckens gab es bisher nur wenige publizierte Daten zum Spannungszustand. In den letzten Jahren hat sich die Kenntnis der Spannungsrichtungen im Subsalar verbessert [1, 2]. Informationen zu Spannungsbeträgen sind allerdings bislang kaum bekannt. Diese sind zum Verständnis von tektonischen Vorgängen jedoch von entscheidender Bedeutung. Die vorliegende Auswertung von zahlreichen tiefen Bohrungen des Norddeutschen Beckens bringen dazu einen Kenntniszuwachs sowohl bei den Spannungsrichtungen wie nunmehr auch bei den Spannungsbeträgen.

Bei den Spannungsrichtungen im Subsalar ergibt sich ein eindeutiges Bild. Aus der Auswertung zahlreicher ABF-Messungen (akustisches Bohrloch-Fernsehen) im Bereich der Altmark ergibt sich ein sehr einheitlicher N–S-Trend bei der Richtung der maximalen horizontalen Hauptspannung. Nach W bis zur niederländischen Grenze schwenkt diese Richtung tendenziell nach NNW bis NW ein und nach E bis zur polnischen Grenze stärker nach NNE.

Im Suprasalar herrscht ein vergleichsweise sehr indifferenter Spannungszustand. Die Spannungsrichtungen sind hier nicht stabil. Im Salinar zeigen die hohen Spülungsdrücke, die beim Bohren gefahren werden müssen, dass keine hohen Differenzspannungen vorhanden sein können. Eine Spannungsübertragung vom Deckgebirge ins Subsalar ist bei einer flächenhaften Verbreitung des Salzes nicht vorhanden. Bei Porendruckgradienten von bis zu 23 MPa/km können sich im Staßfurtkarbonat kaum Scherspannungen oder Differenzspannungen ausbilden.

Entsprechendes gilt auch für die Bereiche, wo die Salinarabfolgen auf Grund ihrer plastischen Eigenschaften einen lithostatischen Spannungszustand anstreben. Über die mächtigen Abfolgen des Zechsteins kann es auf einem flächenmäßig großen Gebiet nicht zu einer Kopplung der rezenten tektonischen Spannungen im Subsalar mit dem suprasalinen Deckgebirge kommen. Mechanisch ist das Deckgebirge vom Subsalar entkoppelt. Der Spannungszustand im Deckgebirge wird vorrangig von der lithologischen Ausbildung der Gesteine, von Steifigkeitskontrasten und von den regionalen Strukturen, d. h. von Sätteln und Mulden sowie von bedeutenden Störungszonen, kontrolliert.

Bei den Spannungsbeträgen im Subsalar zeigt sich, dass die minimale horizontale Hauptspannung kleiner ist als die Vertikalspannung und in der Regel deutlich unter dem Betrag der Vertikalspannung liegt.

Bei Vertikalspannungsgradienten von etwa 25 MPa/km und bei Porendruckgradienten von etwa 12,0 MPa/km ergibt sich im tieferen Subsalar ein effektiver Vertikalspannungsgradient von etwa 13,0 MPa/km. Für einen Reibungswinkel von $\varphi = 30^\circ$, wie er für die gestörte Kruste angenommen wird, ergibt sich für die minimale horizontale Hauptspannung ein Gradient von etwa 16,3 MPa/km. Für eine weniger gestörte Kruste mit einem Reibungswinkel von etwa $\varphi = 45^\circ$ verringert sich der Gradient auf etwa 14,6 MPa/km. Beim gegebenen Porendruck- und Vertikalspannungsgradienten existiert bei den genannten Reibungswinkeln ein Gleichgewicht bei einer rezenten Abschiebungstektonik. Aus den ausgewerteten Daten ergeben sich deutliche Hinweise darauf, dass im tieferen Untergrund des Norddeutschen Beckens die minimale Horizontalspannung deutlich unter der Vertikalspannung liegt. Es gibt kaum Hinweise, dass die maximale horizontale Hauptspannung über der Vertikalspannung liegt. Dementsprechend wird die Situation im Norddeutschen Becken durch eine rezente Abschiebungstektonik charakterisiert. Übergänge zu einer Blattverschiebungskarakteristik sind jedoch nicht ausgeschlossen. Für eine Dominanz der Abschiebungstektonik sprechen die Beobachtungen von rezenten bzw.

*Thomas Röckel¹⁾, Christof Lempp, Martin Luther-Universität/Halle Wittenberg (E-mail: Lempp@geologie.uni-halle.de); ²⁾Jetzt Piewak & Partner GmbH, Bayreuth.

ungen Abschiebungen in der Niederrheinischen Bucht, den Niederlanden und Belgien (Roer-Graben) im Westen sowie einer Abschiebung, wie sie im Osten bei Cottbus beschrieben wurde. Die Entkopplung des Subsalinar vom Suprasalinar führt dazu, dass die angreifenden plattentektonische Kräfte, die in der Oberkruste wirken, mechanisch nicht auf das Deckgebirge übertragen werden können. Dies ist nur an großen Störungssystemen oder dort zu erwarten, wo die salinaren Schichten geringmächtig sind oder fehlen.

1 Einleitung

Im Norddeutschen Becken wurden zahlreiche Bohrungen zur Öl- und Gasprospektion niedergebracht. Aus Bohrkernen und Bohrlochmessungen dieser Bohrungen können wertvolle Erkenntnisse zum Spannungszustand im Norddeutschen Becken abgeleitet werden. Zahlreiche Erdgas- und Forschungsbohrungen erreichen Teufen von 3.000 bis 6.000 m. Die maximale Teufe betrug über 8.000 m.

In den tiefen Bohrungen sind Brucherscheinungen weit verbreitet. Die Intensität und die Form der Brüche werden in erster Linie durch das Gesteinsverhalten und durch den Spannungszustand gesteuert.

Phänomene von Bohrloch-Instabilitäten und von Bohrkern-Instabilitäten sind ausgezeichnete Spannungsindikatoren, die eine Aussage über vorherrschende Spannungszustände in der Erdkruste einer bestimmten Region ermöglichen. Entsprechende Untersuchungen sind auch nach Beendigung der Bohrarbeiten durch Auswertung der Bohrkern- und Bohrlochlogs sowie der bohrtechnischen Daten möglich, selbst wenn die Bohrung nicht mehr zugänglich ist. Vergleiche auf der Datenbasis der KTB haben die bruchmechanischen Phänomene im Bohrloch und am Bohrkern zu einem Instrument für eine zumindest halb-quantitative Spannungsabschätzung gemacht [3, 4].

Ziel der vorliegenden Untersuchung war, die Phänomene von Bohrloch- und Bohrkern-Instabilitäten aus einer Reihe tiefer Bohrungen auf ihre Indikatorfunktion für den Spannungszustand hin auszuwerten. Im Bereich ihrer Standorte sollte es damit möglich sein, Aussagen über Spannungsrichtungen und relative Spannungsbeträge im Untergrund abzuleiten und in eine geomechanische Analyse einzubeziehen.

Zielgebiet dieser Analyse war das Norddeutsche Becken.

Die Ergebnisse zu den Spannungsrichtungen beruhen auf rezenten, aktuellen Brucherscheinungen in den Bohrungen oder an den Bohrkernen. Diese Brucherscheinungen werden soweit möglich unter Einbeziehung von bohrtechnischen Daten interpretiert.

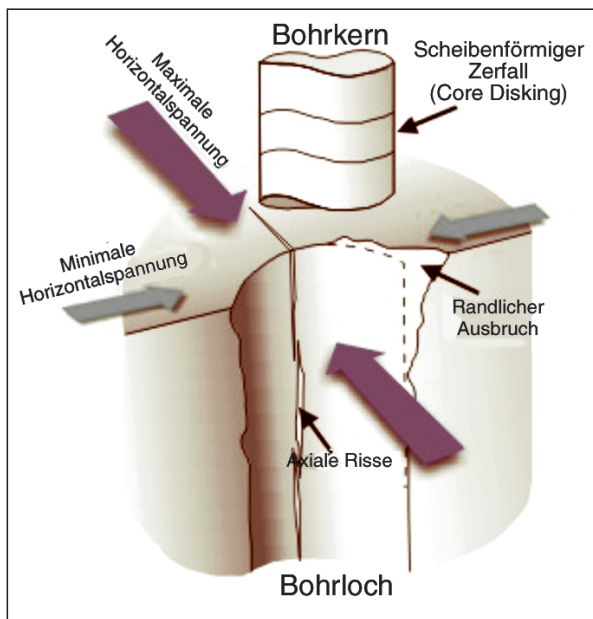


Abb. 1 Bruchphänomene an Bohrkernen und im Bohrloch als Indikatoren des aktuellen Spannungszustandes

tiert. Spannungsrichtungen und Spannungsbeträge reflektieren insoweit einen aktuotektonischen Zustand in der betrachteten Region.

2 Phänomene von Bohrkern- und Bohrlochinstabilitäten

Die in Tiefbohrungen auftretenden Bohrloch- und Bohrkern-Instabilitäten sind bislang nur ansatzweise als Indikatoren für den Spannungszustand untersucht. Eine Ausnahme hiervon bilden die Bohrlochrandausbrüche oder Breakouts. COX [5] und BABCOCK [6] stellten fest, dass die Ausbrüche eine Vorzugsorientierung haben. Seit Jahren sind die Ausbrüche als Indikator für die Richtung der minimalen Horizontalspannungen bekannt [7, 8]. Die Bohrlochwand bricht häufig in zwei einander gegenüberliegenden Bereichen aus. Bei isotropem Gesteinsverhalten treten diese Ausbrüche in Richtung der minimalen Horizontalspannung auf (Abb. 1). Auch bohrtechnisch induzierte, axiale Risse in der Bohrlochwand sowie Centerline fractures und Core Dishing in Bohrkernen eignen sich als Spannungsindikatoren [3, 4].

In den KTB-Bohrungen traten zahlreiche bohrtechnisch induzierte Risse auf und wurden als ausgezeichnete Spannungsindikatoren erkannt [9, 10, 11]. Bei den bohrtechnisch induzierten Rissen handelt es sich um Zugrisse, welche die Bohrlochwand in zwei etwa gleich große Hälften teilt (Abb. 1). Die bohrtechnisch induzierten Risse streichen in Richtung der maximalen Horizontalspannung [12–15].

Bei den Centerline Fractures handelt es sich um bohrtechnisch induzierte Bruchstrukturen in den Bohrkernen. Der Centerline Fracture ist eine nahezu vertikale Struktur und teilt den Bohrkern in zwei ungefähr gleich große Hälften [16, 17]. Die Spannungsrich-

tung von S_1 ergibt sich aus der Orientierung der Umbiegepunkte der Petal Fractures [16, 18].

Core Dishing, das Zerschneiden des Bohrkerns in scheibenförmige Stücke, ist aus einer Reihe von Kristalllinbohrungen beschrieben, es gilt im Bergbau als Indikator für hohe Gebirgsspannungen. Charakteristisch für Core Dishing ist, dass die Scheiben eine konkave Oberseite und eine konvexe Unterseite besitzen. Die Oberseite besitzt zwei morphologische Hochpunkte, die in Richtung der minimalen Horizontalspannung (S_h) orientiert sind, und eine Tiefachse, die in Richtung der maximalen Horizontalspannung (S_H) gerichtet ist. Core Dishing ist in spröden Sedimentgesteinsfolgen ein häufig zu beobachtendes Phänomen. Weiche und wenig spröde Sedimente zeigen kein Core Dishing. Der Zusammenhang zwischen Spannungsrichtungen und der Geometrie dieser

Bruchstrukturen ist in Abbildung 1 zu erkennen.

In Kombination mit bohrtechnischen Daten bilden die genannten Spannungsindikatoren die Grundlage für eine Abschätzung des Spannungszustandes in Bohrungen des Norddeutschen Beckens. Im Norddeutschen Becken treten Erdbeben nur sehr selten auf, weshalb hier auch nur sehr wenige Herdflächenlösungen zur Spannungsanalyse vorhanden sind.

3 Spannungsrichtungen

Die Spannungsrichtungen sollen für das Suprasalinar (Sedimente der Trias und jünger), das Salinar (Zechstein) und das Subsalinar (Rotliegend, Karbon und Devon) getrennt betrachtet werden.

3.1 Suprasalinar

Im Suprasalinar sind die Richtungen (und Beträge, vgl. Abschn. 4.1) der Spannungen oft sehr uneinheitlich entwickelt. Auf engem Raum kommt es hier zu starken Änderungen in den Spannungsrichtungen.

Die Spannungsdaten aus dem Suprasalinar beziehen sich häufig auf seichte Teufen, wobei der Buntsandstein allerdings auch in einigen 1.000 m Tiefe aufgeschlossen wurde. Im Gegensatz zum Subsalinar, dessen Spannungsdaten alle aus tiefen Bohrungen stammen, sind aus dem Suprasalinar nur relativ wenige Daten zu Spannungsrichtungen aus den oberflächennahen Bohrungen, aus Bergwerken und Tunneln verfügbar. Einige Daten sind aus einer Zusammenfassung von älteren Spannungsuntersuchungen [19] entnommen, hier werden auch Daten aus [20–23] aufgeführt. Neuere Daten finden sich in [2, 23]. Einige Daten südlich bzw. südwestlich des Harzes finden sich in [24]. Nicht alle diese Daten sind in der WORLD STRESS MAP verzeichnet [25]. Eine Zu-

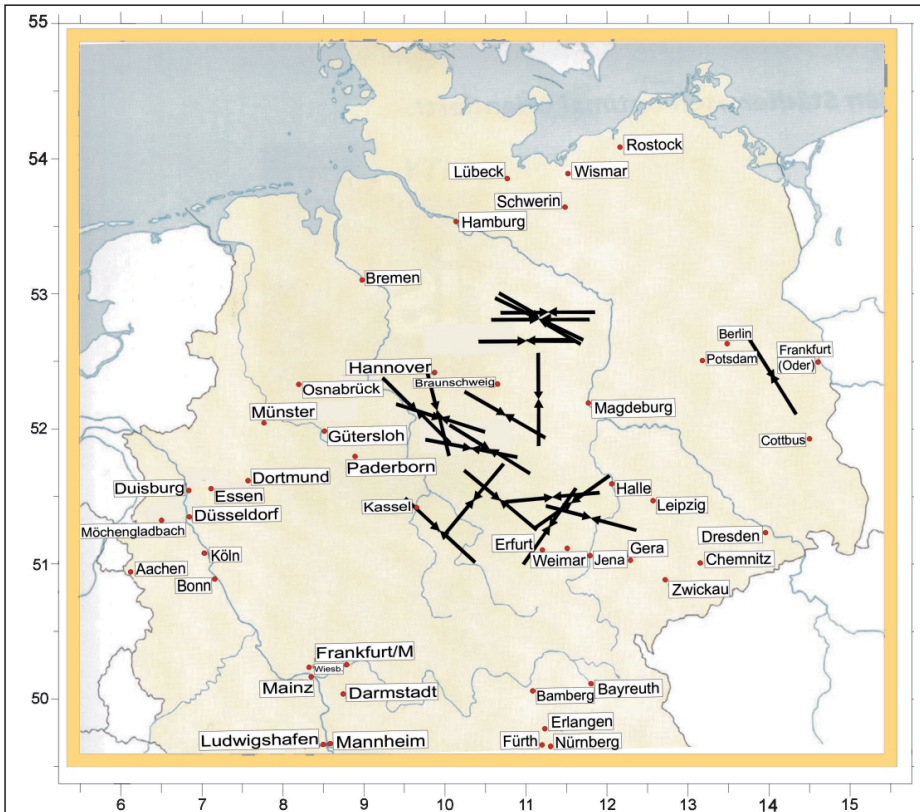


Abb. 2 Orientierung der maximalen horizontalen Hauptspannungen im Suprasalinar

sammenfassung der suprasalinen Spannungsrichtungen ist unter <http://www.geologie.uni-halle.de/igw/inggeo/index.htm> eingestellt (Tabelle 1).

Insgesamt ergibt sich aus diesen Daten, dass die Spannungsrichtungen des Suprasalinars nicht sehr stabil sind. In Abbildung 2 sind die Ergebnisse der Spannungsrichtungen im Suprasalinar dargestellt. Der Mittelwert der 15 betrachteten Lokationen ergibt eine Streichrichtung von S_H von $N 103^\circ$. ESE-WNW orientierte Richtungen und E-W-Richtungen überwiegen.

3.2 Salinarabfolgen

Soweit Kalibermessungen im Salz vorhanden sind, können keine Vorzugsrichtungen bei der Ovalisierung von Bohrungen festgestellt werden.

Aufgrund der plastischen Eigenschaften der z. T. sehr mächtigen salinaren Abfolgen ist eine deutlichen Spannungsanisotropie im Zechsteinsalinar nicht zu erwarten. Sollten sich hier bevorzugte Spannungsrichtungen ausbilden, dann dürften diese im Wesentlichen auf strukturelle Einflüsse in Bereichen mit Salztektonik zurückzuführen sein. Dass kaum bevorzugte Spannungsrichtungen zu erwarten sind, ergibt sich auch aus den Spannungsbeträgen (vgl. Abschn. 4.2), die in den Salinarabfolgen ermittelt wurden.

3.3 Subsalinar

Die Spannungsrichtungen im Subsalinar wurden im betrachteten Bereich des Norddeutschen Beckens in weit über 100 Bohrungen bestimmt. Es handelt sich um Bohrungen im Teufenbereich zwischen 1.000 m

und 6.000 m. Die Daten beruhen auf der Auswertung von Bohrlochrandausbrüchen, Hydraulic-Fracturing-Daten sowie hydraulisch erweiterten Rissstrukturen. Die Bohr-

lochrand-Ausbruchsdaten sind [1, 2, 23] entnommen. Die Hydraulic-Fracturing Daten sind ebenfalls [23] entnommen. Neu ausgewertet wurden ABF-Logs aus dem Bereich der ehemaligen DDR. Die ABF-Logs (akustisches Bohrloch-Fernsehen) wurden durch Erdöl Erdgas Gommern (EEG) zur Verfügung gestellt und waren von guter, teilweise von ausgezeichneter Qualität. Die ABF-Logs wurden überwiegend im Rotliegend aufgezeichnet. Die Tiefenlage beträgt meist um 3.000 m.

Im Bereich der Altmark und den benachbarten Bereichen sind auf einem engem Gebiet Auswertungen von GROTE, ROTH et al. und zuletzt von LEMPP & RÖCKEL vorhanden [1, 23, 26]. Die Spannungsrichtungen, die hier ermittelt wurden, stammen von verschiedenen Bearbeitern, sie beruhen auf unterschiedlichen Methoden (ABF, Vierarm-Kaliber, Breakouts, Hydraulic-Fracturing), und sie stimmen dabei generell sehr gut überein. Die gute Qualität der ABF-Messungen kann so im Bereich der Altmark belegt werden.

Die Mittelwerte der maximalen Horizontalspannung von 30 Bohrungen im Bereich der Altmark betragen $N 177,8^\circ E \pm 21,4^\circ$. 19 Werte wurden aus [1] entnommen und beruhen auf Vierarm-Kalibermessungen. Der Mittelwert von S_H , der sich aus diesen Bohrungen ableitet, beträgt $N 175,4^\circ E \pm 24,1^\circ$. (GROTE [1] $N 175,4^\circ E \pm 24,1^\circ$; LEMPP & RÖCKEL [26]: $N 180,1^\circ E \pm 17,2^\circ$; ROTH et al. [23]: $N 184^\circ E$ bzw. $N 195^\circ E$).

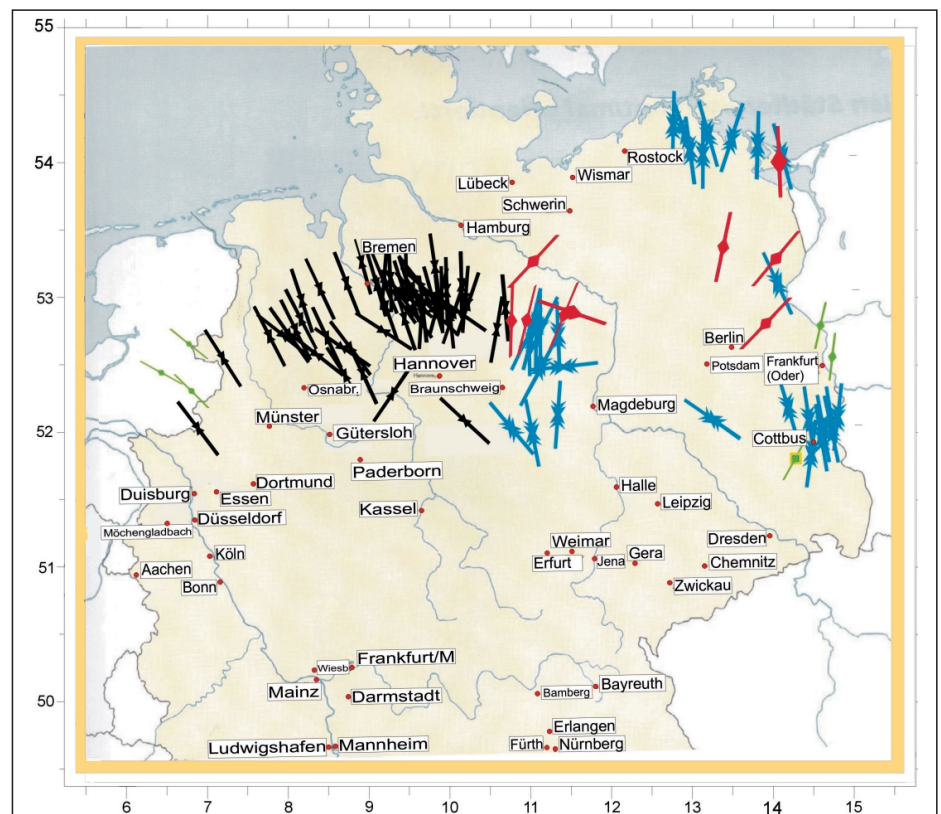


Abb. 3 Orientierung der maximalen Horizontalspannung S_H im Subsalinar. Die Daten von GROTE [1] sind als schwarze Pfeile dargestellt. Die Daten von ROTH et al. [23] und von ROTH & FLECKENSTEIN [2] sind rot, die Daten dieser Arbeit sind als blaue Pfeile gekennzeichnet. Grün sind die Daten aus der Word Stress Map aus den Niederlanden und aus Polen dargestellt. Bei Cottbus ist eine junge Abschiebung zu ersehen.

In Abbildung 3 ist im Bereich der Altmark ein sehr einheitliches Bild für die Orientierung von S_H mit einer ausgesprochenen N–S-Vorzugsrichtung zu erkennen.

Im Bereich um Soltau ist diese Orientierung ebenfalls vorhanden, wobei westlich von Soltau S_H etwas in Richtung NNW–SSE ein dreht. Bis zur niederländischen Grenze ändert sich die Orientierung von S_H noch weiter und dreht in eine NW–SE-Orientierung ein (Abb. 3). Dies stimmt mit der Spannungsrichtung von Bohrungen an der niederländischen Grenze überein, wie sie in der World Stress Map verzeichnet sind [25].

Östlich des 10. Breitengrades (Altmark) ist diese Tendenz entgegengesetzt, hier gibt es eine leichte Tendenz, dass S_H in Richtung NNE–SSW ein dreht (Abb. 3). Die Ergebnisse der ABF-Auswertung an der polnischen Grenze stimmt hier wiederum sehr gut mit Ergebnissen aus benachbarten Bohrungen in Polen überein, so wie sie ebenfalls in der World Stress Map [25] und in [23] verzeichnet sind.

Die Änderung der Spannungsrichtung von NW–SE an der niederländischen Grenze über N–S im Bereich des Ostteils des Norddeutschen Beckens (mit einer leichten NNE–SSW-Komponente zur polnischen Grenze) erfolgt mehr oder weniger kontinuierlich. Von diesem Trend weichen lokal einige Befunde ab (z. B. die Bohrung Luckenwalde).

Im Bereich des Norddeutschen Beckens sind nur wenige geologische Indikatoren für die Orientierung des rezenten Spannungsfeldes vorhanden. Junge Abschiebungen, die das Quartär im Bereich der Niederrheinischen-Bucht versetzen, streichen NW–SE, und fügen sich nahtlos in das Bild ein, das sich aus der Orientierung von S_H aus den Tiefbohrungen ergibt.

Aus dem Bereich des Ostteils des Norddeutschen-Beckens sind geologische Spannungsindekatoren nur von einer Lokation beschrieben. Eine quartäre Abschiebung im Bereich N 51,66° und E 14,24° (ca. 15 km SW von Cottbus) ist bei PILARSKI [27] in [28] erwähnt. Die Streichrichtung von S_H , die aus der Abschiebung abgeleitet wird, ist mit N 30°E angegeben. In der Bohrung Lakoma 3, die in der Nähe der Abschiebung gelegen ist, wurde die Richtung von S_H mit N 16°E bestimmt.

Für den Bereich, der etwa zwischen 52° und 55° nördlicher Breite liegt, ergibt sich der Trend, dass von der niederländischen Grenze die Orientierung von S_H von der NW–SE-Richtung um etwa 45° bis maximal ca. 60° im Uhrzeigersinn auf

etwa N–S bis NNE–SSW an der polnischen Grenze rotiert (Abb. 3). Dieses Ergebnis kann aber nicht weiter nach Süden übertragen werden, weil sich dort aus einigen wenigen Tiefbohrungen und Ergebnissen von Herdflächenlösungen [29] eine einheitlichere Spannungsorientierung ergibt [4].

3.4 Vergleich der S_H -Richtungen von Suprasalinar und Subsalinar

Der Vergleich der S_H -Spannungsrichtungen zeigt, dass sich in beiden Stockwerken die Richtungen so gut wie nicht überlappen. Wäre zwischen Suprasalinar und Subsalinar eine mechanische Kopplung vorhanden, dann sollten in beiden Stockwerken zumindest tendenziell ähnliche Richtungen vorhanden sein. ROTH et al. [23] führen für den Bereich der Bohrungen PES und ML im Suprasalinar Richtungen von S_H an, die nahezu Ost-West gerichtet sind, während im tieferen Untergrund deutlich eine bevorzugte Nord-Süd-Richtung für S_H vorhanden ist. Insgesamt ergibt sich für den betrachteten Bereich des Norddeutschen Beckens (51° N bis 53° N und 9° E bis 11° E) im Subsalinar eine deutliche N–S-Orientierung von S_H . Die stark unterschiedlichen Richtungen von S_H für das Suprasalinar und das Subsalinar des Norddeutschen Beckens, deuten auf eine weitgehende mechanische Entkopplung dieser beiden Stockwerke voneinander hin.

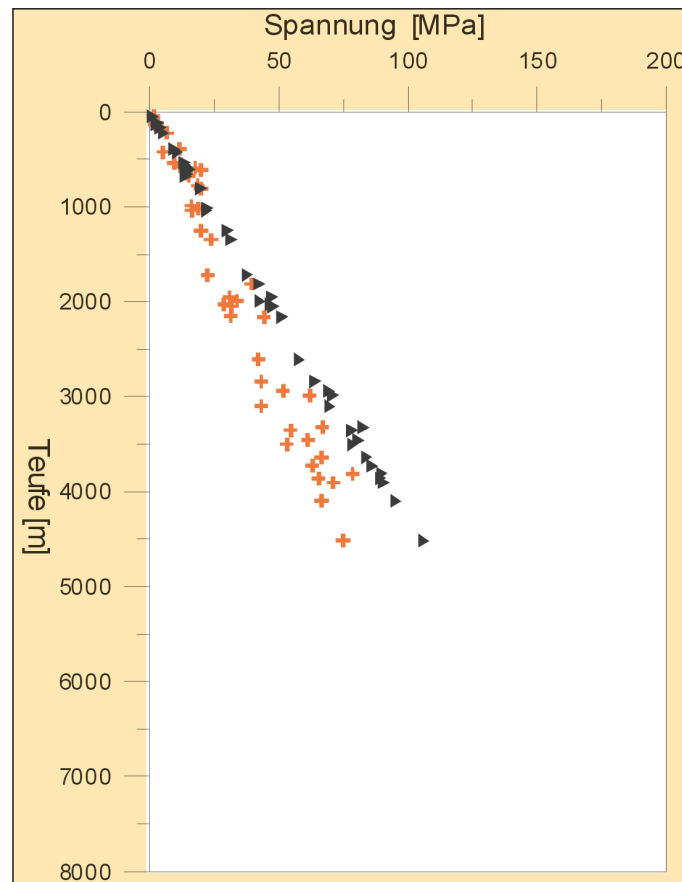


Abb. 4 Spannungsbeträge im Suprasalinar. Die Vertikalspannung ist als schwarzes Dreieck dargestellt, die minimale Horizontalspannung als oranges Kreuz.

4 Bestimmung der relativen Spannungsverhältnisse bzw. der Spannungsbeträge

In Tiefbohrungen kann der Betrag der Vertikalspannung bestimmt werden, wenn er konventionell aus der überlagernden Gesteinssäule errechnet wird.

Der Betrag der maximalen horizontalen Hauptspannung ist nur schwierig zu bestimmen, denn zu seiner Berechnung sind eine Reihe von theoretischen Annahmen nötig.

Die Beträge der minimalen Horizontalspannung können aus Hydraulic-Fracturing-Versuchen und Leakoff-Tests (Druckstabilitätsprüfungen) ermittelt werden. Bei Tiefbohrungen wurde das Gebirge bei Druckstabilitätsprüfungen bis zum Bruch belastet, wobei diese Versuchsdurchführung meist einfacher und das getestete Intervall oft länger ist als beim gezielten Hydraulic-Fracturing-Versuch.

Aus bohrtechnischen Gründen wird bei Tiefbohrungen häufig die Spülung beschwert; hierbei wird das Gebirge ebenfalls häufig bis zum Bruch belastet. Bei Kenntnis der hydraulischen Randbedingungen kann hieraus ebenfalls der Betrag der minimalen horizontalen Hauptspannung abgeschätzt werden.

In vielen der untersuchten Bohrungen traten Centerline Fractures und Petal Fractures auf. Soweit Centerline Fractures vorhanden sind, ist dies ein Hinweis auf niedrige Beträge der minimalen Horizontalspannung S_h . Treten zusammen mit Centerline Fractures auch Spülungsverluste beim Bohren auf, oder sind Verluste beim Zementieren der Verrohrungen dokumentiert, so ergeben sich Hinweise auf den Betrag der minimalen horizontalen Hauptspannung S_h . Details zur Auswertung der minimalen horizontalen Hauptspannung sind unter <http://www.Geologie.Uni-halle.de/igw/inggeo/index.htm> (Abschnitt 9) aufgeführt.

4.1 Suprasalinare Deckgebirge

Aus der Literatur sind einige Angaben zu Spannungsbeträgen im suprasalinen Deckgebirge vorhanden. Durch die aktuellen Auswertungen von Druckstabilitätsproben, Spülungs- und Zementverlusten konnte die Datenbasis stark erweitert werden. In Abbildung 4 sind die Beträge der minimalen horizontalen Spannung S_h und der Vertikalspannung S_v dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sowohl niedrige S_h -Horizontalspannungsgradienten (unter 15 MPa/km) und auch sehr hohe S_h -Horizontalspannungsgradienten (über 20 MPa/km) vorkommen.

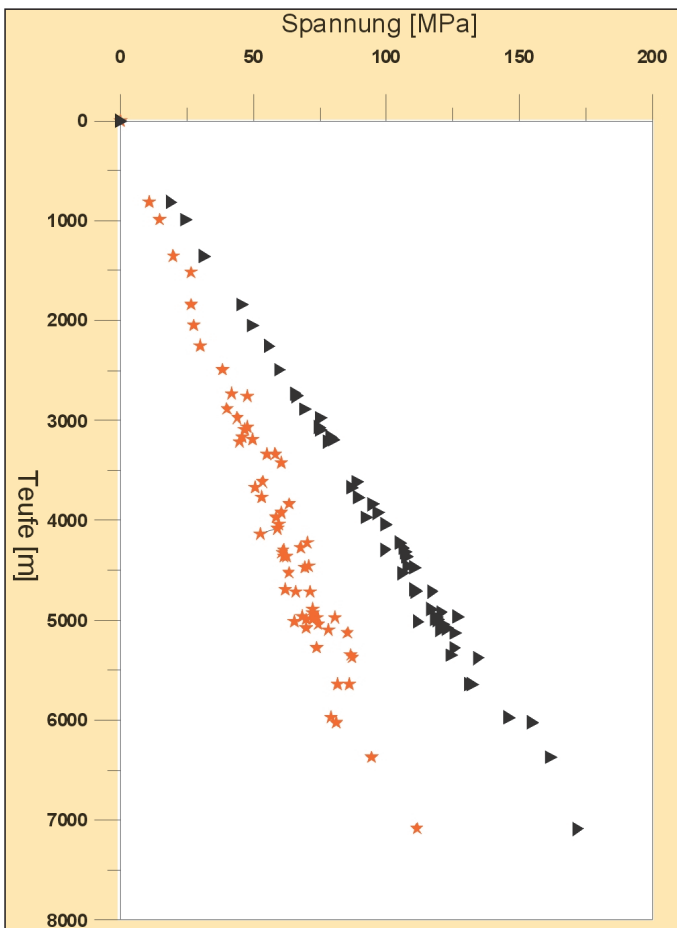


Abb. 5 Spannungsbeträge im Subsalinar. Die Vertikalspannung ist als schwarzes Dreieck dargestellt, die minimale Horizontalspannung als oranger Stern.

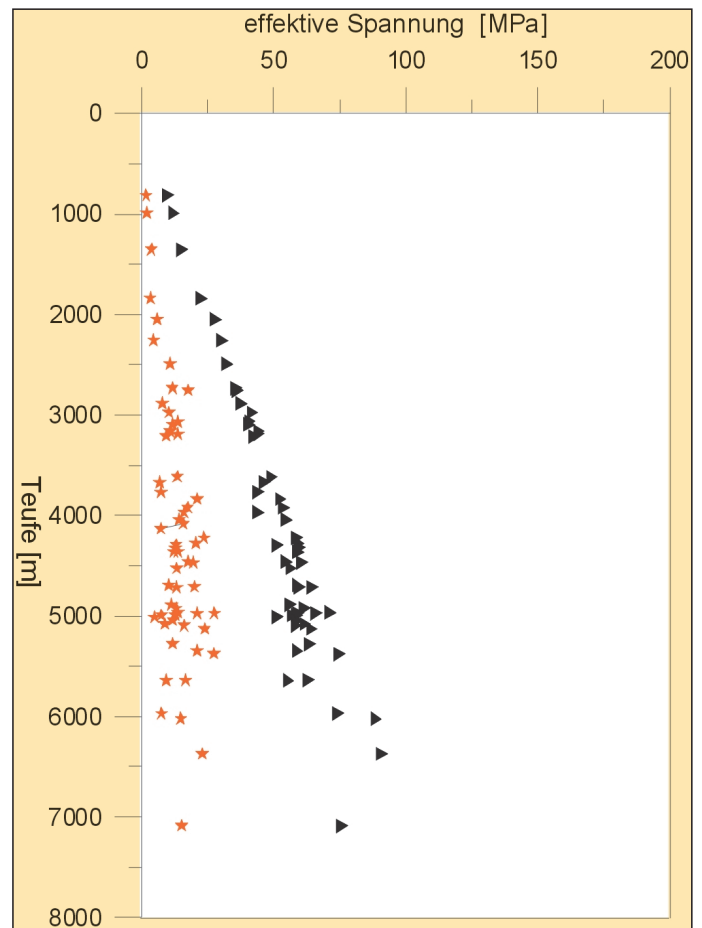


Abb. 6 Effektive Spannungsbeträge im Subsalinar. Die effektive Vertikalspannung ist als schwarzes Dreieck dargestellt, die minimale effektive Horizontalspannung als oranger Stern.

4.2 Salinar (Zechstein)

In einer Reihe von Bohrberichten wird immer wieder darauf verwiesen, dass beim Bohren im Salz das Spülgewicht stark erhöht werden musste, um Verklemmungen des Bohrgestänges zu verhindern. Spülgewichte von über $1,8 \text{ g/cm}^3$ finden im Salz häufig Verwendung. Bereichsweise musste das Spülgewicht auf über $2,1 \text{ g/cm}^3$ erhöht werden (z. B. Wittenberge bei 3.776 m: $20,6 \text{ MPa/km}$). Die verwendeten Spülgewichte wurden zum Teil bis zum Vertikalspannungsgradienten erhöht. Diese Maßnahme diente insbesondere dem Ziel, Gaszuflüsse aus dem Staßfurtkarbonat zu kompensieren. In diesem Bereich erreichte der Porendruck in den Karbonaten nahezu den lithostatischen Zustand.

Aus dem Zusammenhang von Gaszuflüssen und Spülgewichtsverlusten in einem sehr engen Druckbereich nahe dem lithostatischen Spannungsniveau ergibt sich, dass in den mächtigen Salinarabfolgen ein nahezu lithostatischer Spannungszustand vorherrschend ist. Dementsprechend ist in Bereichen mit einer hohen Salzmächtigkeit auch nicht mit einem deutlich anisotropen Spannungszustand zu rechnen. In der Bohrung Garlipp 1/86 z. B. betrug im Salz zwischen 3.000 m und 3.800 m die Spüldichte $2,06 \text{ g/cm}^3$, sie erreichte am Rohrschuh der technischen Rohrtour (2.995 m) $2,13 \text{ g/cm}^3$. Dies bedeu-

tet aber auch, dass in diesen Gesteinsfolgen keine klare Vorzugsrichtung der Horizontalspannungen vorhanden ist. KAPPLER et al. [30] geben für das Zechstein maximale Porendruckgradienten von $23,05 \text{ MPa/km}$ ($2,35 \text{ kp/cm}^2/\text{m}$) an.

In der Bohrung Schwaan 1b/76 wurde der Porendruckgradient mit $22,60 \text{ MPa/km}$ bestimmt. Dieser Gradient entspricht nahezu dem Vertikalspannungsgradienten. Aus diesem Befund ergibt sich, dass die effektive Vertikalspannung (S_v') im Salinar nahezu zu vernachlässigen ist. Wenn aber S_v' fast gegen Null geht, dann gilt dies auch für S_h' und S_h' .

Im Bereich von eingeschalteten harten Schichten (Anhydrit) oder weichen Schichten (Tone) sind starke Abweichungen von dem hier festgestellten allgemeinen Trend zu erwarten, ebenso am Übergang zum Suprasalinar und zum Subsalinar. Details zu den Spannungsbeträgen im Salinar sind im Abschnitt 9 unter <http://www.geologie.uni-halle.de/igw/inggeo/index.htm> zu finden.

4.3 Subsalinar

Im Subsalinar ist die Datenlage zu Spannungsrichtungen und zu Spannungsbeträgen deutlich besser als im Suprasalinar. Aus der KW-Erschließung liegen zum Teil sehr gut auswertbare Daten vor.

Im Salinar wurden die meisten Bohrungen

mit sehr hohen Spülgewichten niedergebracht. Spülgewichte von über $1,8 \text{ g/cm}^3$ sind üblich. Nach dem Durchteufen der Salinarfolgen wird üblicherweise vor dem Aufschluss des Rotliegenden eine Verrohrung eingebaut, weil sonst das Spülgewicht nicht abgesenkt werden kann. Bei den Rotliegendenspeichern ist dies regelmäßig notwendig, weil zum einen sonst der Speicher geschädigt und zum anderen sonst die Formation durch das hohe Spülgewicht massiv gefract werden würde. Um einen Bruch der Formation zu verhindern, wird der Spüldruckgradient i. d. R. auf etwa max. 15 MPa/km bis 16 MPa/km abgesenkt. Dennoch kommt es gelegentlich zum Aufbrechen der Formation. In den Rotliegendfolgen werden trotz ihrer hohen Festigkeiten z. B. die Vulkanite gefract. Neben teilweise massiven Spülgewichtsverlusten in den Rotliegendgesteinen treten auch Spülgewichtsverluste in Gesteinen des Karbons und des Devons auf.

Es ist sehr auffällig, dass die Spülgewichtsverluste im tieferen Untergrund insbesondere in spröderen Gesteinen verbreitet sind. In diesen Bohrungen sind sehr häufig vertikale Entspannungsklüfte beschrieben (Centerline Fractures). Diese finden sich in sehr ähnlicher Ausbildung in verschiedenen tieferen Bohrungen, z. B. in der Bohrung Münsterland im westlichen Norddeutschen Becken,

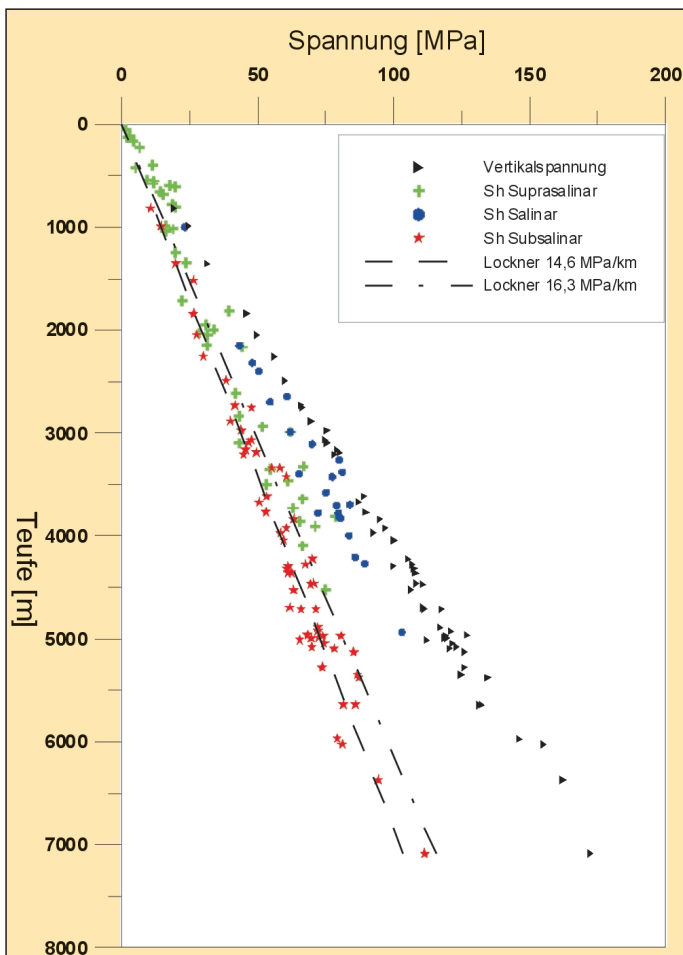


Abb. 7 Zusammenstellung der Spannungsbeträge im Suprasalinar, Salinar und Subsalinar und Vergleich der Subsalinar-Daten mit den theoretischen Werten nach [32]

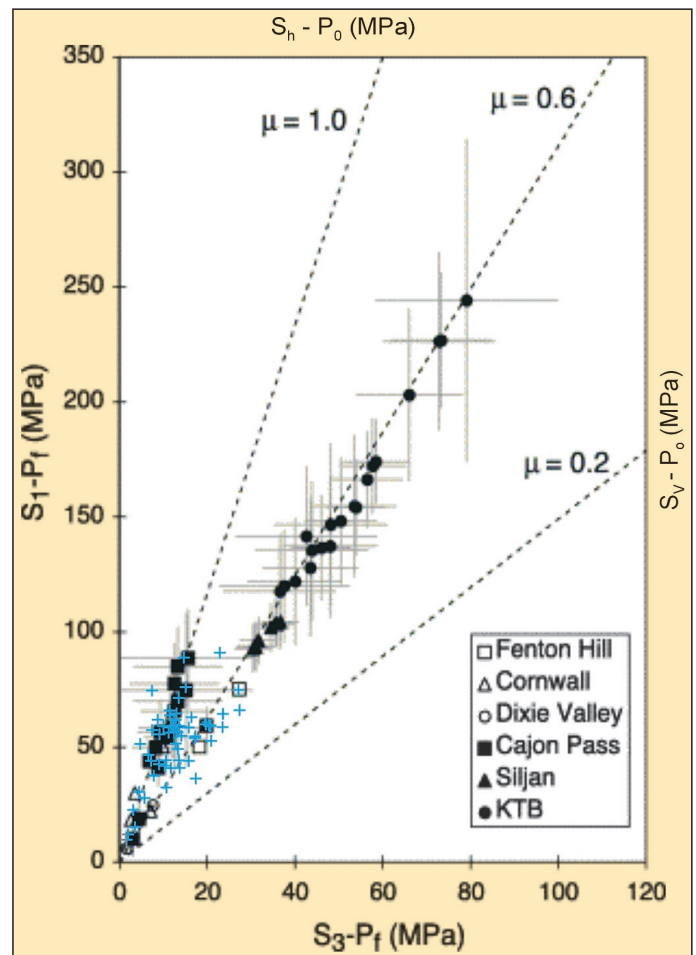


Abb. 8 Zusammenstellung der effektiven Spannungsbeträge im Subsalinar (blaue Kreuze) im Vergleich mit den Daten aus [33]

sehr deutlich auch im östlichen Norddeutschen Becken in der Bohrung Salzwedel 2/64, in der Bohrung Mirow 1/74, in den Bohrungen Loissin 1/70 sowie in der Bohrung Pudagla 1/86. Centerline Fractures wurden auch in Bohrkernen tieferer Bohrungen auf Rügen beobachtet. Auch aus dem süddeutschen Raum sind Centerline Fractures aus dem Kristallin von KTB, Urach und Soultz bekannt. Die Spannungsbeträge von S_h liegen hier jeweils deutlich unter dem Betrag von S_v .

In der Bohrung Mirow 1/74 ist in einer Tiefe von 7.090 m bis 7.180 m das Bohrloch exakt maßhaltig. Dies deutet auf niedrige Horizontalspannungsdifferenzen im tieferen Untergrund als auch auf niedrige Horizontalspannungen hin. Der Betrag von S_H dürfte auch hier deutlich unter dem Betrag von S_V liegen.

In Tabelle 6 (<http://www.geologie.uni-halle.de/igw/inggeo/index.htm>, Abschnitt 9) sind die Ergebnisse der Spannungsauswertungen im Subsalinar zusammengefasst. In Abbildung 5 sind die Beträge der minimalen horizontalen Hauptspannung und der Vertikalspannung gegen die Tiefe dargestellt.

Im Jahre 2002 wurden in der Bohrung Groß Schönebeck Stimulationsexperimente durchgeführt. Hierbei ergaben sich im Teufenbereich von 4.083 m bis 4.133,5 m Gra-

dienten der minimale Horizontalspannung zwischen 12,7 und 14,5 MPa/km [31]. Diese Daten fügen sich sehr gut in das Bild ein, das aus der Auswertung von Altdaten gewonnen wurde. Diese Situation ist kompatibel mit rezenten bzw. jungen Abschiebungen in der Niederrheinischen Bucht, den Niederlanden und Belgien (Roer-Graben) sowie einer Abschiebung, die bei Cottbus beschrieben wurde.

4.3.1 Porendruckwirkungen in Rotliegendbohrungen

Im Bericht zur Forschungsbohrung Schwerin 1/87+1a/89 sind die Ergebnisse von 80 Schichtdruckmessungen im Rotliegenden (tieferes Oberrotliegendes) zusammengefasst. Die (Poren-)Druckgradienten lagen hierbei mit zwei Ausnahmen unter 1,3 (g/cm^3). In den einzelnen Gebieten wurden folgende Schwankungsbreiten der Porendruckgradienten (in g/cm^3) festgestellt: Altmark-Ostflanke 1,11–1,26, Ostbrandenburg, Tucher Senke 1,06–1,09, Ostbrandenburg, N-Flanke und W-Periklinale 1,15–1,22, Beckenzentrum, (Wbge7E, Ven 1) 1,14–1,22.

Ausnahmen im Beckenzentrum sind die Bohrungen Grevesmühlen 1/78 mit einem Porendruckgradienten von 1,44 (g/cm^3) und Schwaan 1/76 mit 1,35 (g/cm^3).

In Abbildung 6 ist die effektive Vertikalspannung S_v' gegen die effektive minimale Horizontalspannung S_h' dargestellt.

Die effektiven minimalen Horizontalspannungen sind sehr niedrig. Es ist ein Trend zu erkennen, dass die Effektivspannungen bis etwa 6.000 m zunehmen. Unterhalb von 6.000m nehmen sie eventuell wieder ab. Dieser letzte Befund ist auf Grund der wenigen Messpunkte aber nicht eindeutig zu belegen. Im Zechstein wurden häufig nahezu lithostatische Porendrücke gemessen. Hier gehen die effektiven Spannungen sehr stark zurück.

5 Folgerungen für den Spannungszustand im Norddeutschen Becken

Wegen der häufig hohen Porendruckgradienten von bis zu 23 MPa/km, können sich im Staßfurtkarbonat kaum Scherspannungen oder Differenzspannungen ausbilden. Entsprechendes gilt auch für die Bereiche, wo die Salinarabfolgen aufgrund ihrer plastischen Eigenschaften einen lithostatischen Spannungszustand anstreben. Über die mächtigen Abfolgen des Zechsteins kann es auf einem flächenmäßig großen Gebiet nicht zu einer Kopplung der rezenten tektonischen Spannungen des Subsalinars mit dem suprasalinen Deckgebirge kom-

men. Die geomechanischen Vorgänge im Deckgebirge sind vom Subsalinar weitgehend entkoppelt. Der Spannungszustand im suprasalinen Deckgebirge wird vermutlich stark von der lithologischen Ausbildung der Gesteine, von Steifigkeitskontrasten und von den regionalen Strukturen, Sattel- und Muldenstrukturen sowie von bedeutenden Störungszonen kontrolliert, die stockwerksübergreifend durchhalten.

Angreifende plattentektonische Kräfte, die in der spröden Oberkruste wirken, können mechanisch nicht auf das suprasalinare Deckgebirge übertragen werden. Dies ist nur dort zu erwarten, wo die salinaren Schichten geringmächtig sind oder ganz fehlen. Eine Spannungsübertragung an großen Störungssystemen, an denen starre Blöcke des Subsalinars an die des Suprasalinars stoßen, ist denkbar.

LOCKNER [32] betont in seinen Betrachtungen zu kristallinen Spannungszuständen, dass die Regionen der Erdkruste in allen Größenmaßstäben geklüftet sind. Unter diesen Bedingungen verhält sich die Kruste wie ein reibungsbehaftetes »Coulomb«-Material ohne Kohäsion. Unter der Annahme eines Reibungswinkels der Gesteine von $\varphi = 30^\circ$, das einem Reibungsbeiwert von $\mu = 0,58$ entspricht, hydrostatischem Porendruck und einer durchschnittlichen Gesteinsdichte von $2,7 \text{ g/cm}^3$, ergibt sich für die minimalen und maximalen effektiven Spannungen:

$$\sigma_3' \geq \sigma_1'/3.$$

Unter diesen Bedingungen stellt der Spannungszustand $3 \sigma_3' = \sigma_1'$ die Grenzbedingung für eine beginnende Bruchbildung dar. Unter Abschiebungsbedingungen, wo die Vertikalspannung die größte Hauptspannung ist ($S_v = \sigma_1$), ergibt sich die minimale Horizontalspannung zu

$$S_h = 0,58 S_v.$$

Dieses Spannungsverhältnis wird in Bereichen mit Abschiebungstektonik häufig beobachtet [32]. Daraus ist abzuleiten, dass insbesondere im tieferen (subsalinaren) Untergrund des Norddeutschen Beckens eine Tendenz zur rezenten Abschiebungstektonik besteht.

Die totalen Vertikalspannungsgradienten von etwa 25 MPa/km, wirksam bei Porendruckgradienten von etwa 12,0 MPa/km im tieferen Subsalinar, ergeben einen effektiven Vertikalspannungsgradienten von etwa 13 MPa/km. Unter Annahme eines Reibungswinkels von $\varphi = 30^\circ$ für eine bruchhaft gestörte Erdkruste ergibt sich ein Gradient für S_h von etwa 16,3 MPa/km. In einer weniger entfestigten Kruste mit Reibungswinkeln von ca. $\varphi = 45^\circ$ verringert sich der »kritische« Gradient von S_h , bei dem sich der Porendruck, die Vertikalspannung und diese Reibungswinkel zusammen im Gleichgewicht befinden, auf etwa 14,6 MPa/km.

Die theoretischen Geraden für die Reibungswinkel von $\varphi = 30^\circ$ und 45° sind auch in Abbildung 7 dargestellt.

Im Ungleichgewichtsfall ist mit rezenter Abschiebungstektonik zu rechnen. Aus den ausgewerteten Daten ergeben sich deutliche Hinweise, dass der tiefere Untergrund des Norddeutschen Beckens durch eine rezente Abschiebungstektonik charakterisiert werden kann.

ZOBACK & TOWNEND [33] haben für die Bohrungen Fenton Hill, Cornwall, Dixie Valley, Cajon Pass, Silian und KTB eine Darstellung der effektiven minimalen Hauptspannung im Vergleich zur effektiven maximalen Hauptspannung gegeben, um damit typische Spannungszustände in der Erdkruste aufzuzeigen.

In Abbildung 8 sind in die entsprechende Darstellung in [33] die Daten von über 50 Tiefbohrungen aus dem Norddeutschen Becken hineinprojiziert.

Bei der Kompilation zeigt sich, dass von 59 Werten nur 16 Werte außerhalb des Feldes liegen, das sich für Reibungswinkel von $\varphi = 30^\circ$ ($\mu = 0,58$) bis 45° ($\mu = 1$) ergibt. Für Reibungswinkel von $\varphi = 25^\circ$ ($\mu = 0,47$) bis 48° ($\mu = 1,11$) liegen nur 3 Werte außerhalb des theoretisch zu erwartenden Bereiches.

Die Entkopplung des Subsalinar vom Suprasalinar führt dazu, dass die angreifende plattentektonische Kräfte, die in der spröden Kruste wirken, mechanisch nicht auf das suprasalinare Deckgebirge übertragen werden. Dies ist nur dort zu erwarten, wo die salinaren Schichten geringmächtig sind oder fehlen. Eine Spannungsübertragung an großen Störungssystemen an denen starre Blöcke des Subsalinars an die des Suprasalinars stoßen ist denkbar.

Die entsprechenden Tabellen mit den individuellen Bohrungsdaten sowie eine ausführliche Darstellung der Auswertemethodik stehen unter <http://www.geologie.uni-halle.de/igw/inggeo/index.htm> zur Verfügung.

Der Fa. Erdöl Erdgas Gommern (EEG) danken wir sehr für die Möglichkeit zur Datenerhebung in ihrem Archiv und zur Publikation der gewonnenen Daten. Dr. Ehling vom Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt danken wir für die Möglichkeit, Bohrkern der Forschungsbohrungen auswerten zu können.

Literatur

- [1] GROTE, R. (1998): Die rezente horizontale Hauptspannung im Rotliegenden und Oberkarbon in Norddeutschland. Erdöl Erdgas Kohle, 114, (10) 478–482.
- [2] ROTH, F. & FLECKENSTEIN, P. (2001): Stress orientation found in north-east Germany differ from the West European trend. Terra Nova, 13, 289–296.
- [3] RÖCKEL, Th. (1996): Der Spannungszustand in der tieferen Erdkruste am Beispiel des KTB-Programms. Veröffentl. des. Inst. für Boden- und Felsmechanik, 137, Karlsruhe, ISSN 0453-3267.
- [4] RÖCKEL, Th. & LEMPP, Ch. (1998): Bohrkern und Bohrkerninstabilitäten als Indikatoren des

Spannungszustandes der Erdkruste von Mitteleuropa. Expanded abstracts in the Proceedings of the ICDP/KTB-Meeting, June 04. and 05, 1998, Ruhr-University of Bochum and Deutsche Forschungsgemeinschaft.

- [5] COX, J. W. (1970): The high resolution dipmeter reveals dip-related borehole and formation characteristics. 11th Ann. Logging Symp., Soc. Prof. Well Log Analysis.
- [6] BABCOCK, E. A. (1978): Measurement of subsurface fracture from dipmeter logs. Am. Assoc. Petrol. Geologist Bull., 62: 1.111–1.126.
- [7] BELL, J. S. & GOUGH, D. I. (1979): Northeast-southwest compressive stress in Alberta: evidence from oilwells. Earth Planet. Sci. Lett., 45: 475–482.
- [8] BLÜMLING, P., FUCHS, K. & SCHNEIDER, T. (1983): Orientation of the stress field from breakouts in a crystalline well in a seismic active area. Phys. of the Earth and Planet. Int., 33, Elsevier, Amsterdam.
- [9] BORM, G., LEMPP, Ch., NATAU, O. & RÖCKEL, Th. (1989): Instabilities of borehole and drillcores in crystalline rocks, with examples from the KTB pilot hole. Scientific Drilling, 1: 105–114, Springer.
- [10] NATAU, O., BORM, G. & RÖCKEL, Th. (1990): Influence of Lithology and Geological Structure on the Stability of the KTB Pilot Hole. In MAURY, V. & FORMAINTRAUX, D. (eds). Rock at Great Depth, Proc. Int. Symp. ISRM, 3, 1487–1490, Pau, France.
- [11] RÖCKEL, Th., NATAU, O. & DIETRICH, H. G. (1992): Core reorientation by comparison of core instabilities and borehole instabilities. In EMERMANN, R., DIETRICH, H. G., LAUTERJUNG, J., und WÖHRL, Th., (eds), KTB Hauptbohrung, Results of the Geoscientific Investigation in the KTB Field Laboratory, 0–6.000 m, KTB Report 92-2: F1–F17.
- [12] DEZAYES, CH., GENTER, A. & VILLEMIN, T. (1996): Fracturation heritee et induite caracterisee a partir d'images acoustique et electriques de parois de forages. Bull. Centres Rech. Explor.-Prod. Elf Aquitaine, 20, 197–212, Pau.
- [13] TENZER, H., BUDEUS, P. & SCHNELLSCHMIDT, R. (1992): Fracture analyses in hot dry rock drillholes at Soultz and Urach by borehole televiwer measurements. Geothermal Resources Council TRANSACTIONS, 16: 317–321.
- [14] TENZER, H., SCHANZ, U. & GENTER, A. (1998): Entwicklung und Charakterisierung eines HDR-Wärmetauschers im HDR-Projekt Soultz sous Forets. 6. Geothermische Fachtagung, Straubing 12.–15.05.1998, Abstracts.
- [15] BRUDY, M. & KJÆRHOLT, H. (2001): Stress orientation on the Norwegian continental shelf derived from borehole failures observed in high-resolution borehole imaging logs. Tectonophysics 337, p 65–84, Amsterdam.
- [16] LORENTZ, J. C., FINLEY, S. J. & WARPINSKI, N. R. (1990): Significance of coring-induced fractures in Mesaverde core, northwestern Colorado. AAPG Bulletin, 74: No 7, 1017–1029.
- [17] NETH, G. & DIETRICH, H. G. (1983): Entlastungsklüfte in Kristallin-Bohrkernen der Erdwärme-Forschungsbohrung Urach 3, S. 184–199. In: Unveröffentl. Endbericht der Stadtwerke Bad Urach über »Untersuchung der geothermischen Anomalie Urach auf eine mögliche wirtschaftliche Nutzung einschließlich Frac Studien in der erweiterten Forschungsbohrung Urach«. Forschungsarbeiten im Rahmen der BMFT-Projekte 03-E-4023 A/BC sowie der EG-Projekte 176-77 EGD und 176-77 EGD Nachtrag NR.1 vom 30.10.83.
- [18] KULANDER, B. R., DEAN, S. L. & WARD, B. J. jr. (1990): Fractured core analysis, interpretation, logging, and use of natural and induced fracture

- in core. AAPG Methods in Exploration Series, 8: Tulsa, Oklahoma.
- [19] BECKER, A. & PALADINI, S. (1990): In-situ-Spannungen in Nord- und Mitteleuropa. *Schr. Angew. Geol. Karlsruhe*, 10, 1–63.
- [20] RUMMEL, F. & BAUMGÄRTNER, J. (1982): Spannungsmessungen im östlichen Bereich der Süddeutschen Scholle. *Bericht an die BGR*, 145 S.
- [21] BAUMANN (1982): Spannung und Spannungsumwandlung im Rheinischen Schiefergebirge.- 232 S. Koblenz (Numismat. Verlag).
- [22] KNOLL, P. (1979): Analyse der Gebirgsspannungen in Bergbaurevieren der DDR. *Freiberger Forschungshefte C*, 349, 61–73.
- [23] ROTH, F., BÄSLER, H., WEIGOLD, G., FUCHS, K., PALMER, J. & FLECKENSTEIN, P. (1998): Spannungsmessungen in Osteuropa – Orientierungsdaten aus Nordost-Deutschland, Weißrussland und der Ukraine. *ICDP/KTB-Kolloquium, Wissenschaftliches Programm und Abstracts*, Bochum.
- [24] BANKWITZ, P., GROSS, U. & BANKWITZ, E. (1993): Krustendeformation im Bereich der Finne-Kyffhäuser-Gera-Jachimov-Zone. *Z. geol. Wiss.*, 21 (1/2), Berlin.
- [25] MUELLER, B., REINECKER, J., HEIDBACH, O. and FUCHS, K. (2000): The 2000 release of the World Stress Map (available online at <http://www.world-stress-map.org>).
- [26] LEMPP, Ch. & RÖCKEL, Th. (1999b): Bohrloch- und Bohrkern-Instabilitäten als Indikatoren des regionalen Spannungszustandes. *Ber. 12. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie*, 12.–16.4. 1999, Halle/S., 94–104, Fachsektion Ing.- Geol. DGG/DGGT.
- [27] PILARSKI, I. (1988): Neotektonik S-Teil DDR, *Res. Rep. ZO 06000-7530-1339*, Zentralinst. für Phys. der Erde, Potsdam.
- [28] GRÜNTHAL, G. & STROMEYER, D. (1992): The recent stress field in central Europe: trajectories and finite element modeling. *J. Geophys. Res.*, Vol 97, B 8.
- [29] PLENEFISCH, T. & BONJER, K. P. (1997): The stress field in the Rhine Graben area inferred from earthquake focal mechanism and estimation of frictional parameters. *Tectonophysics*, 275, 71–97, Elsevier.
- [30] KAPPLER, W., KARKOSSA, H. & JAPP, D. (1974): Erfahrungen und technisch-technologische Probleme beim Aufschluss wechselgelagerter hochdruck- und spülungsverlustgefährdeter Horizonte. *Zeitschrift für Angewandte Geol.*, 20, Heft 9.
- [31] TISCHNER, T., LEGARTH, B. & HUENGES, E. (2002): Stimulationsexperimente in den Rotliegend-Sandsteinen der Bohrung Groß Schönebeck: Ergebnisse zur Hydraulik und Gebirgsmechanik. *Tagungsband der 7. Geothermischen Fachtagung*, 06.–08.11.2002 in Waren (Müritz), S. 166–175.
- [32] LOCKNER, D. A. (1995): »Rock Failure«.- in: *Rock Physics and Phase Relation: A Handbook of Physical Constants*. T. Ahrens (ed.), AGU, Washington D. C., 127–147.
- [33] ZOBACK, M. D. & TOWNEND, J. (2001): Implication of hydrostatic pore pressure and high crustal strength of the deformation of intraplate lithosphere. *Tectonophysics*, 336, 19–30, Elsevier.

