

Zeitschrift: Eclogae Geologicae Helvetiae
Herausgeber: Schweizerische Geologische Gesellschaft
Band: 80 (1987)
Heft: 2: Beiträge zur Geologie der Nordschweiz : Symposium "Geologie der Nordschweiz"

Artikel: Die Entkoppelung des tektonischen Spannungsfeldes an der Jura-Überschiebung
Autor: Müller, Walter H. / Blümling, Peter / Becker, Arnfried
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-166008>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 27.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Entkopplung des tektonischen Spannungsfeldes an der Jura-Überschiebung

Von WALTER H. MÜLLER¹⁾, PETER BLÜMLING¹⁾, ARNFRIED BECKER²⁾
und BIRGIT CLAUSS³⁾

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Arbeit zeigt, dass das tektonische Spannungsfeld in der Nordschweiz sowohl lateral als auch vertikal inhomogen ist. Während das Grundgebirge die aus anderen Bereichen Mitteleuropas bekannte horizontale Spannungsrichtung von 135° zeigt, treten im Deckgebirge lokal unterschiedliche horizontale Spannungsrichtungen auf. Neben leichten Drehungen des Spannungstensors in den Sedimenten des Nordschweizer Permokarbon-Trogs (horizontale Spannungsrichtung 160°), fällt insbesondere die ausgeprägte Rotation in den Sedimenten (horizontale Spannungsrichtung 10°) südlich der Kollisionsfront des Faltenjuras auf. Die Abscherung in den evaporitischen Serien im Keuper und dem Mittleren Muschelkalk entkoppelt Deck- und Grundgebirge und ermöglicht diese Drehung.

ABSTRACT

This study documents the three-dimensional structure of the tectonic stress field in Northern Switzerland. Investigations in the basement are in good agreement with other studies of the stress field in Central Europe (135°), also significant rotations of the stress field were observed in the sediments. Minor rotations of the stress tensor are attributed to local effects of the concealed Permo-Carboniferous (horizontal stress direction 160°) trough beneath Northern Switzerland while a more pronounced change of the orientation of the stress field is apparent in the sediments south of the Jura collision front (horizontal stress direction 10°). This rotation is possibly due to a decoupling of the stresses by the decollement horizon within the evaporite series of the Keuper and the Mittlere Muschelkalk.

1. Einleitung

Im Rahmen der Studien der Nagra über die Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle besitzt das «Neotektonische Untersuchungsprogramm» einen hohen Stellenwert. Diese Untersuchungen wurden interdisziplinär angegangen und beinhalten neben geomorphologischen (HALDIMANN et al. 1984), geodätischen (GUBLER et al. 1984), geologisch-tektonischen (NAEF et al. 1985, ISLER 1984a, 1984b) und seismotektonischen Arbeiten (PAVONI 1984) auch Studien über die Erdbebentätigkeit in der Schweiz (MAYER-ROSA et al. 1984, DEICHMANN & RENGGLI 1984) sowie über das rezente Spannungsfeld (BECKER et al. 1984). Die bisherigen Ergebnisse aus diesen neotektonischen Studien

¹⁾ Nagra, Parkstrasse 23, CH-5401 Baden.

²⁾ Geol. Institut der Universität Karlsruhe, Kaiserstrasse 12, D-7500 Karlsruhe 1.

³⁾ Geophys. Institut der Universität Karlsruhe, Hertzstrasse 16, D-7500 Karlsruhe 21

(DIEBOLD & MÜLLER 1985) zeigen übereinstimmend, dass die Alpen wie auch die Nordschweiz keinen geologisch-tektonisch inaktiven Körper darstellen, sondern dass ihre rezente tektonische Beanspruchung und Deformation den Verhältnissen der letzten paar Millionen Jahre entsprechen dürfte. Auf besonders eindrucksvolle Weise zeigt die Entkopplung des Spannungsfeldes des Grundgebirges von dem des darübergleitenden Deckgebirges im Vorfeld des Faltenjuras diese jüngsten tektonischen Bewegungen.

Spannungsmessungen und vor allem die Interpretation der Messungen ist eine sehr heikle Aufgabe. Um Aussagen über das rezente Spannungsfeld machen zu können, benötigt man eine grosse Anzahl von Daten, die möglichst mit verschiedenen Methoden erhoben werden sollten. Eine Einzelmessung kann vielen zufälligen Einflüssen und Fehlern unterliegen, so dass ihr Ergebnis nicht unbedingt repräsentativ für das Spannungsfeld einer Region sein muss. Einflüsse von lokalen tektonischen Gegebenheiten, topographische Effekte sowie grössere Gesteinskörper mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften können das lokale Spannungsfeld beeinflussen und die Interpretation erschweren.

In der Nordschweiz liegt heute eine beträchtliche Anzahl von Daten vor, die mit sehr unterschiedlichen Methoden erhoben wurden, und die unter Einbezug der Tektonik ein sehr plausibles Spannungsbild ergeben.

Die Daten für die Bestimmung des rezenten Spannungsfeldes wurden mittels der Methode der Bohrlochrandausbrüche (BLÜMLING 1986) aus den Nagra-Tiefbohrungen und in-situ Spannungsmessungen (BECKER 1985) erhoben sowie durch seismotektonische Analysen (PAVONI 1984, BONJER & APOPEI 1986) gewonnen. Diese Daten wurden mit Paläospannungsmessungen aus Horizontal-Stylolithen aus dem Falten- und Tafeljura (MEIER 1984) und aus der Bohrung Schafisheim verglichen. Dabei zeigte sich, dass das heutige Spannungsfeld seit mehreren Millionen Jahren, d. h. seit der Bildung der Horizontal-Stylolithen mehr oder weniger richtungskonstant gewesen sein muss.

2. Verwendete Methoden zur Bestimmung des Spannungsfeldes

2.1 Untersuchung von Bohrlochrandausbrüchen

Die Methode zur Bestimmung von horizontalen Spannungsrichtungen aus Bohrlochrandausbrüchen wurde von BELL & GOUGH (1979) eingeführt. Durch eine gezielte Weiterentwicklung der Methode (BLÜMLING et al. 1983, ZOBACK et al. 1985) und dem erfolgreichen Vergleich der Ergebnisse mit anderen unabhängigen Spannungsmessungen konnte die Bohrloch-Ausbruchsanalyse zur Routineuntersuchung ausgebaut werden.

Die Grundlage für die Ausbruchstheorie bildet die Spannungsverteilung im Bereich einer Bohrung im horizontal anisotropen Spannungsfeld. Die analytische Berechnung dieser Verteilung für eine gelochte Platte wurde von KIRSCH (1898) erstmals vorgenommen. In Polarkoordinaten ergibt sich folgende Lösung:

Normalspannung auf der Fläche $r = \text{const}$

$$\sigma_r = \frac{S_H + S_h}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{S_H - S_h}{2} \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4} - 4\frac{a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta$$

Normalspannung auf der Fläche $\theta = \text{const}$

$$\sigma_{\theta} = \frac{S_H + S_h}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{S_H - S_h}{2} \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta$$

Scherspannung auf der Fläche $r = \text{const}$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{S_H - S_h}{2} \left(1 - 3\frac{a^4}{r^4} + 2\frac{a^2}{r^2}\right) \sin 2\theta$$

S_H und S_h sind die maximale bzw. minimale Horizontalspannung in grosser Entfernung zum Bohrloch. Der Winkel θ wird gegen die S_H -Richtung gemessen; r ist der Abstand zum Ursprung (Mittelpunkt der Bohrung) und a der Radius des Bohrlochs.

Berücksichtigt man den Einfluss der Bohrspülung ΔP nicht, so müssen aus Stetigkeitsgründen am Bohrlochrand die Spannungen σ_r und $\tau_{r\theta}$ gleich 0 sein. Nur die Komponente σ_{θ} ist von Null verschieden und nimmt den Wert

$$\sigma_{\theta} = (S_H + S_h) - 2(S_H - S_h) \cos 2\theta$$

in Abhängigkeit des Winkels θ an. Es ist zu erkennen, dass am Bohrlochrand Spannungsmaxima (kompressiv) für die Winkel $\theta = 90^\circ$ bzw. 270° auftreten. Diese Maxima sind der Grund für das Auftreten von Bohrlochrandausbrüchen. Im Gegensatz dazu können im Bereich der Winkel $\theta = 0^\circ$ bzw. 180° die Spannungsminima sogar trotz allseitiger Kompression im Fernfeld zu lokalen Zugspannungen führen. Dieser Effekt wird bei Spannungsmessungen nach dem Prinzip des Hydraulic Fracturing ausgenutzt.

Die Erweiterung der Bohrung auf nahezu elliptische Form kann theoretisch mit Hilfe des Coulomb-Navier-Kriteriums beschrieben werden. Berechnungen dazu zeigen, dass die angenommenen konjugierten Scherbrüche die tatsächlich beobachteten Ausbrüche in der Ausbruchsform gut beschreiben (SCHNEIDER 1985, BLÜMLING 1986). Allerdings können, wie in Laborversuchen gezeigt wurde (MASTIN 1984, ZOBACK et al. 1985), auch zur Grenzfläche parallele Trennflächen auftreten und zu Ausbrüchen führen. Die Kontroverse bei der Diskussion über den tatsächlichen Ausbruchmechanismus hat jedoch für die Auswertung der Orientierung des Spannungsfeldes keine Bedeutung. In beiden Fällen verläuft die Ausbruchrichtung senkrecht zur Orientierung der maximalen Horizontalspannung S_H .

Anders liegt der Fall bei der Interpretation von Spannungsbeträgen. Hier muss der Bruchvorgang bekannt sein. Es konnte gezeigt werden (BLÜMLING 1986), dass die im Labor und in einigen Feldmessungen (ZOBACK et al. 1985) durchgeführte Bestimmung von Spannungsbeträgen in vielen Fällen äusserst kritisch bzw. nahezu unmöglich ist, da ein kontinuierliches Bruchwachstum (MASTIN 1984, SCHNEIDER 1985) durch die Änderungen der geometrischen Randbedingungen in Betracht gezogen werden muss. Aus diesen Gründen wurde auf eine Auswertung der Spannungsbeträge verzichtet.

Auch bei der Bestimmung der horizontalen Spannungsrichtung können Probleme auftreten. Anisotropes Material und damit verbundene Anisotropien im Bruchverhalten von Materialien können zur Rotation und zur Änderung der Ausbruchssymmetrie führen (BLÜMLING 1986). Insbesondere bei grosser Spannungs- und Materialanisotropie

kann eine Rotation der Ausbruchsrichtung beobachtet werden, die nicht auf eine Rotation des Spannungsfeldes zurückzuführen ist. Dieser Effekt, der insbesondere in Oberflächennähe (Tiefen < 300 m) beobachtet werden kann, ist beim Einsatz von Televiermessungen, aber auch durch die Interpretation von Leitfähigkeitsanomalien bei Kalibermessungen erkennbar (BLÜMLING 1986). Durch entsprechende Datenbearbeitung und theoretische Überlegungen kann der Einfluss von Materialanisotropien aus der Ausbruchsform abgeschätzt und korrigiert werden.

2.2 Die Überbohrverfahren

Eine weitere Methode, tektonische Spannungen in-situ im Gebirge zu messen, ist das Überbohrverfahren. Dieses Verfahren zählt zu den indirekten Messmethoden, da hier die Spannungen aus den nach dem Herauslösen eines Kerns aus dem Gesteinsverband bestimmten Dehnungen berechnet werden. Zwei bekannte Überbohrverfahren sind die Doorstopper- und die Triaxialzellenmessmethode.

Die Doorstoppermethode wurde von LEEMAN (1964) eingeführt und in der Folge in vielen Details verbessert (CAHNBLEY 1970). Bei dieser Methode wird eine Messzelle mit bis zu vier in unterschiedlichen Richtungen angeordneten Dehnungsmeßstreifen verwendet. Nach dem Bohren bis zur gewünschten Messtiefe wird die Bohrlochsohle plan geschliffen und auf Inhomogenitäten überprüft. Dann wird die Sohle getrocknet und entfettet, damit die Messzelle mit der Dehnungsmeßstreifenrosette auf die Bohrlochsohle aufgeklebt werden kann. Nach dem Abbinden des Klebers wird eine Nullmessung der Widerstände durchgeführt, die Messzelle überbohrt und der Bohrkern mit aufgeklebten Dehnungsmeßstreifen gezogen. An der Oberfläche kann nun die durch die Entspannung bedingte Dehnung mit einer Messung der Widerstandsänderung bestimmt werden. Mit Hilfe des Elastizitätsmoduls, der mit der Goodman-Sonde (GOODMAN et al. 1968) oder an Bohrkernen im Labor bestimmt wird, sowie der Poisson-Zahl können aus diesen Dehnungen die horizontalen Spannungen sowohl richtungs- als auch betragsmässig bestimmt werden. Die Messungen werden durch Wiederholungsmessungen in verschiedenen Messtiefen verifiziert, um die Bestimmung der Spannungen sicherer zu machen und Ausreisser zu eliminieren.

Der Einsatz der dargestellten Methode ist limitiert, da erstens keine Messungen unter dem Grundwasserspiegel durchgeführt und zum anderen nur horizontale Spannungen ermittelt werden können. Für grössere Tiefen und zur Ermittlung des vollständigen Spannungszustandes bietet sich daher die Nutzung der Triaxialmesszelle an. Sie wurde von LEEMAN & HAYES (1966) entwickelt und beruht auf folgendem Prinzip: Man bohrt nach dem Erreichen der Messtiefe ein Pilotbohrloch mit kleinerem Durchmesser. In dieses Pilotbohrloch wird die Triaxialsonde eingebracht. Die Dehnungsmeßstreifen sind dabei derart angeordnet, dass sie mit Hilfe einer mechanischen Vorrichtung gegen die Bohrlochwand gedrückt und aufgeklebt werden können. Verwendet werden pro Sonde 3 Messrosetten mit bis zu 4 Dehnungsmeßstreifen. Sie werden in einer Ebene senkrecht zur Bohrlochachse unter verschiedenen Winkeln an die Bohrlochwand geklebt und ermöglichen daher die vollständige Bestimmung der Komponenten des Spannungstensors. Auch bei diesem Verfahren wird zunächst eine Nullmessung durchgeführt, dann die im Pilotbohrloch befindliche Meßsonde überbohrt und gezogen. Die nachfolgende Messung an der Oberfläche erlaubt wiederum, aus den gemessenen Dehnungswerten und unter Ver-

wendung der Gebirgsparameter (Poisson-Zahl, Elastizitätsmodul) die tektonischen Spannungen im Gebirge zu bestimmen.

2.3 Paläospannungsbestimmungen mittels Horizontalstylolithen

Es waren die grundlegenden Untersuchungen von WAGNER (1964), die dazu führten, dass Analysen von Horizontal-Stylolithen (H-Stylolithen) und verwandte Formen mit in die tektonische Strukturanalyse einbezogen wurden. Er nutzte dabei die Erkenntnis, dass Stylolithen Drucklösungserscheinungen sind, deren kegel- bzw. zapfenartige Formen in Richtung der grössten lokalen Hauptspannung weisen. Es wird grundsätzlich unterschieden zwischen Vertikalstylolithen, bei welchen die Zapfenrichtungen senkrecht zur Schichtung stehen und den Horizontalstylolithen. Die Vertikalstylolithen sind durch den lithostatischen Überlagerungsdruck entstanden, die Horizontalstylolithen durch laterale tektonische Beanspruchung. Daher können die Horizontalstylolithen als Paläospannungsindikatoren benutzt werden.

Für die Rekonstruktion der tektonischen Paläospannungsrichtung muss beachtet werden, dass die H-Stylolithengenese an ein präexistentes Trennflächengefüge geknüpft sein kann (WAGNER 1964, MEIER 1984). Die Zapfen sind dabei nicht immer senkrecht zur jeweiligen Stylolithenfläche gerichtet. Man unterscheidet darum H-Stylolithen i.e.S., Schrägstylolithen und Nadelharnische.

Nadelharnische bilden sich entlang präexistenter Trennflächen, weshalb die Nadeln oft unterschiedlich orientiert sind. Die bevorzugten Richtungen decken sich vielfach mit den Richtungsmaxima bereits existierender Kluftsysteme (MEIER 1984). Nadelharnische können aus diesem Grunde nicht für eine Paläospannungsanalyse verwendet werden. Bei Schrägstylolithen lassen sich auch öfters Abweichungen gegenüber dem allgemeinen Richtungstrend der reinen H-Stylolithen feststellen, wodurch auch sie nur bedingt für die Paläospannungsanalyse verwendet werden können.

Trotz dieser Vorbehalte zeigen bei sorgfältiger Feldaufnahme die strukturanalytischen Auswertungen der H-Stylolithen oft eine überraschend gute Übereinstimmung der Richtungsmaxima verschiedener Meßstellen aus einem tektonisch homogen beanspruchten Gebiet.

3. Ergebnisse der Spannungsmessungen aus Bohrlochrandausbrüchen

Im Rahmen geowissenschaftlicher Untersuchungen zur Lagerung radioaktiver Abfälle im Grundgebirge wurden in der zentralen Nordschweiz 6 Bohrungen abgeteuft und vermessen. Für die Untersuchung der Bohrlochrandausbrüche standen für alle Bohrungen Kaliberdaten und zum Teil auch Teviewerdaten zur Verfügung. Aufgrund der vorliegenden kontinuierlichen Messprofile, aber auch Dank der Ergebnisse der Kernuntersuchungen und der geophysikalischen Sondierungen (SPRECHER & MÜLLER 1986), konnte das regionale Spannungsfeld in der zentralen Nordschweiz detailliert untersucht werden.

3.1 Resultate im Grundgebirge

Daten aus dem Grundgebirge liegen von den in die Untersuchung eingeschlossenen Bohrungen nur für 5 Bohrungen (Böttstein, Kaisten, Weiach, Schafisheim und Leuggern)

vor. Schwierig erwies sich die Auswertung der Daten aus der Bohrung Leuggern. Es waren keine gerichteten Ausbrüche festzustellen, so dass auf eine Analyse verzichtet werden musste.

Die Bohrung Riniken wurde nicht bis ins Grundgebirge gebohrt. Zwei Bohrungen – Böttstein und Kaisten – erreichten das kristalline Grundgebirge schon in relativ geringer Tiefe (315 m bzw. 297 m). In der Bohrung Böttstein sind im Kristallin deutliche Vorzugsrichtungen der Ausbrüche zu erkennen. In 350–580 m sowie in 800–1500 m Tiefe liegt das Ausbruchsazimut bei Werten von $35^\circ \pm 15^\circ$, während im Tiefenintervall von 600–800 m eine deutliche Richtungsänderung auf $110^\circ \pm 20^\circ$ zu erkennen ist (Fig. 1).

Die Auswertung der Ergebnisse aus der Bohrung Kaisten erwies sich als äusserst problematisch, da nur in zwei Tiefenbereichen des Kristallins gerichtete Ausbrüche zu erkennen sind. Ansonsten erscheint der Bohrlochquerschnitt kreisrund. Erst die statistische Auswertung der Azimutaufzeichnungen erlaubte es, die beobachtete Ausbruchsrichtung von $35^\circ \pm 10^\circ$ als die für den gesamten Kristallinbereich relevante Ausbruchsrichtung zu definieren (BLÜMLING 1986).

Die tiefste der untersuchten Bohrungen, die Bohrung Weiach, erreicht erst in einer Tiefe von 2020 m das kristalline Grundgebirge, da die Bohrung den mächtigen Nordschweizer Permokarbon-Trog durchteuft. Unmittelbar nachdem die Bohrung in das Kristallin eindringt, beginnt die Ausbruchsrichtung sich in die aus den anderen Kristal-

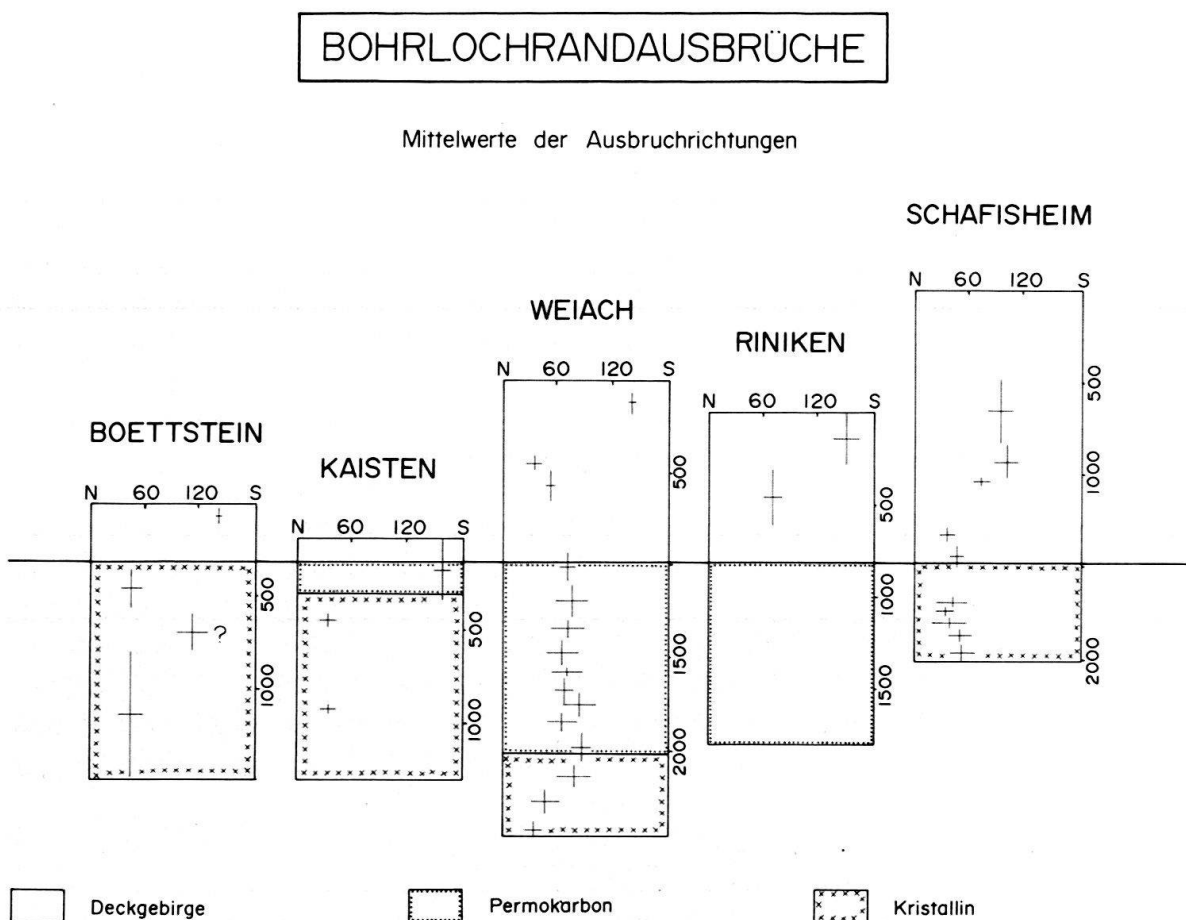


Fig. 1. Mittelwerte der Ausbruchsrichtungen in Nagra-Bohrungen der Nordschweiz

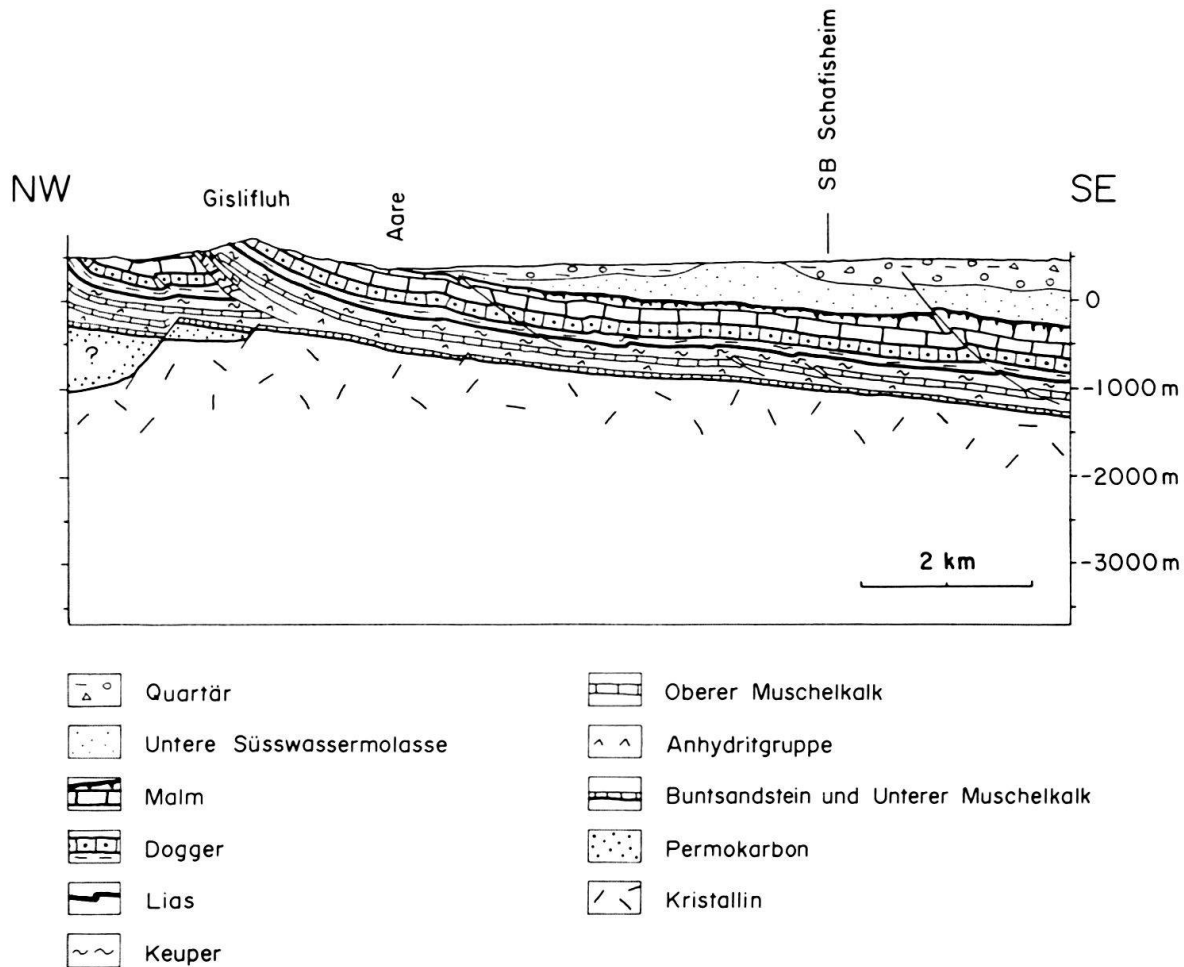


Fig. 2. Geologisches Profil im Bereich der Bohrung Schafisheim

linbohrungen bekannte Richtung von $40^\circ \pm 10^\circ$ zu drehen. Diese Richtung bleibt dann im gesamten Kristallinbereich bis 2482 m erhalten.

Die Bohrung Schafisheim, die in Kapitel 4 noch eingehend behandelt wird, erreicht das Grundgebirge in 1490 m Tiefe (Fig. 2). Im oberen Teil des Kristallins (Fig. 3) sind, ähnlich wie in der Bohrung Kaisten, keine ausgeprägten Ausbrüche zu beobachten. Die durchgeführte statistische Auswertung der Ausbruchszimute führt zu Ausbruchrichtungen von 45° . Der Fehler muss in diesem Fall jedoch mit mindestens $\pm 20^\circ$ angegeben werden. Die Signifikanz dieser statistischen Auswertung zeigt sich allerdings im weiteren Verlauf der Bohrung Schafisheim. Hier untermauern die beobachteten Ausbrüche das Ergebnis aus dem schwerer auszuwertenden Teil des Kristallinbereichs.

Figur 7 fasst die Ergebnisse aus dem Grundgebirge noch einmal zusammen und zeigt die Konstanz der Orientierung des Spannungsfeldes im Grundgebirge. Dabei stehen die beobachteten Richtungen von $135^\circ \pm 15^\circ$ nicht alleine, vielmehr werden sie durch Ergebnisse von Herdflächenlösungen von Erdbeben aus dieser Region unterstützt (BONJER et al. 1984, BONJER 1984, PAVONI 1984). Die abgeleitete Richtung entspricht ebenfalls der von AHORNER (1975) angegebenen generellen Orientierung des heutigen Spannungsfeldes in Zentraleuropa.

3.2 Resultate im Deckgebirge

Bei der Interpretation der Bohrlochrandausbrüche im Deckgebirge wurden verschiedene Beobachtungen gemacht, die zunächst nur schwer zu erklären waren. Als erstes muss hier die Tatsache erwähnt werden, dass in den oberflächennahen Sedimentgesteinen (Tiefe < 300 m) Ausbrüche in $140^\circ \pm 10^\circ$ in nahezu allen Bohrungen beobachtet wurden. Nur für die Bohrung Schafisheim konnte für diesen Bereich keine Aussage gemacht werden, da hier die entsprechenden Daten fehlen. Die oben angegebene Ausbruchsrichtung steht genau senkrecht zu den Ausbruchsrichtungen im Kristallin und es stellt sich die Frage, ob eine generelle Drehung des Spannungsfeldes vom Grund- zum Deckgebirge vorliegt. Eine derart abrupte Drehung und die damit notwendige Entkopplung des tieferen Stockwerks ist nur schwer zu erklären. Da ähnliche Beobachtungen, also eine Drehung der Ausbruchsrichtung in geringen Tiefen, auch in der geothermischen Bohrung Urach 3, in Erdölbohrungen im Rheingraben und in australischen Bohrungen (BLÜMLING 1986) gemacht wurden, muss man eher von einer durch den Ausbruchmechanismus bedingten Rotation sprechen, obgleich lokal andere Ursachen im Gebiet der Nordschweiz prinzipiell nicht ausgeschlossen werden können (BECKER et al. 1984).

BLÜMLING (1986) erklärt dieses Phänomen durch einen Ausbruchmechanismus, der besonders bei starker Material- bzw. Spannungsanisotropie zu erwarten ist. Da gerade in Oberflächennähe das Verhältnis der horizontalen Spannungen S_H/S_h am grössten ist (MC GARR & GAY 1978), sollte dieser Effekt in geringen Tiefen am häufigsten vorkommen. Die Tiefe, bei der die normalen Ausbruchmechanismen wieder auftreten, könnte einen Hinweis auf Spannungsmagnituden geben. Allerdings ist diesem Effekt noch nicht weiter nachgegangen worden, da es an entsprechenden, zur Eichung notwendigen, unabhängigen Vergleichsmessungen in den gleichen Bohrungen mangelt.

In grösseren Tiefen im Deckgebirge werden weitere interessante Beobachtungen gemacht. In der Bohrung Weiach werden in Malm (430–478 m) und Dogger (478–666 m) Ausbruchsrichtungen von $35^\circ \pm 10^\circ$ bzw. $52^\circ \pm 5^\circ$ beobachtet. Im tieferen Muschelkalk, dem Buntsandstein sowie den Sedimenten des Perms und des Oberkarbons zeigt sich eine auffallende Rotation der Ausbruchsrichtung auf $70^\circ \pm 15^\circ$, was einer Rotation des Spannungsfeldes um ca. 30° auf 160° entsprechen würde. Diese Rotation der horizontalen Spannungsrichtung im Permokarbon-Trog scheint sich durch die Ergebnisse in Riniken bis in eine Tiefe von 620 m zu bestätigen. Leider sind in dieser Bohrung bei grösseren Tiefen die spannungsbedingten Ausbrüche durch bohrtechnisch bedingte Ausbrüche überlagert, so dass Aussagen über grössere Tiefen hier unmöglich sind. Die Drehung der Spannungsrichtung kann durch die Geometrie des Trogs und seine Richtung im Verhältnis zum regionalen Spannungsfeld im Kristallin erklärt werden. Wie von CLAUSS (1987) gezeigt wurde, ist eine entsprechende Rotation des Spannungsfeldes für die Sedimente des Trogs zu erwarten.

Aus der Bohrung Schafisheim (Fig. 3), der einzigen Bohrung die durch die Jura-Überschiebung gebohrt wurde, liegen, wie oben erwähnt, nur Daten aus Tiefen grösser als 300 m vor. In den tertiären Sedimenten (300–570 m) sind nur sehr schwache Ausbrüche zu erkennen, die in 57° zu verlaufen scheinen. Im unteren Teil der Bohrung dreht die Ausbruchsrichtung im Malm und im oberen Teil des Doggers auf $97^\circ \pm 10^\circ$. Im Keuper sind nahezu keine oder aber nur sehr schwache Ausbrüche in $60^\circ \pm 20^\circ$ Richtung vorhan-

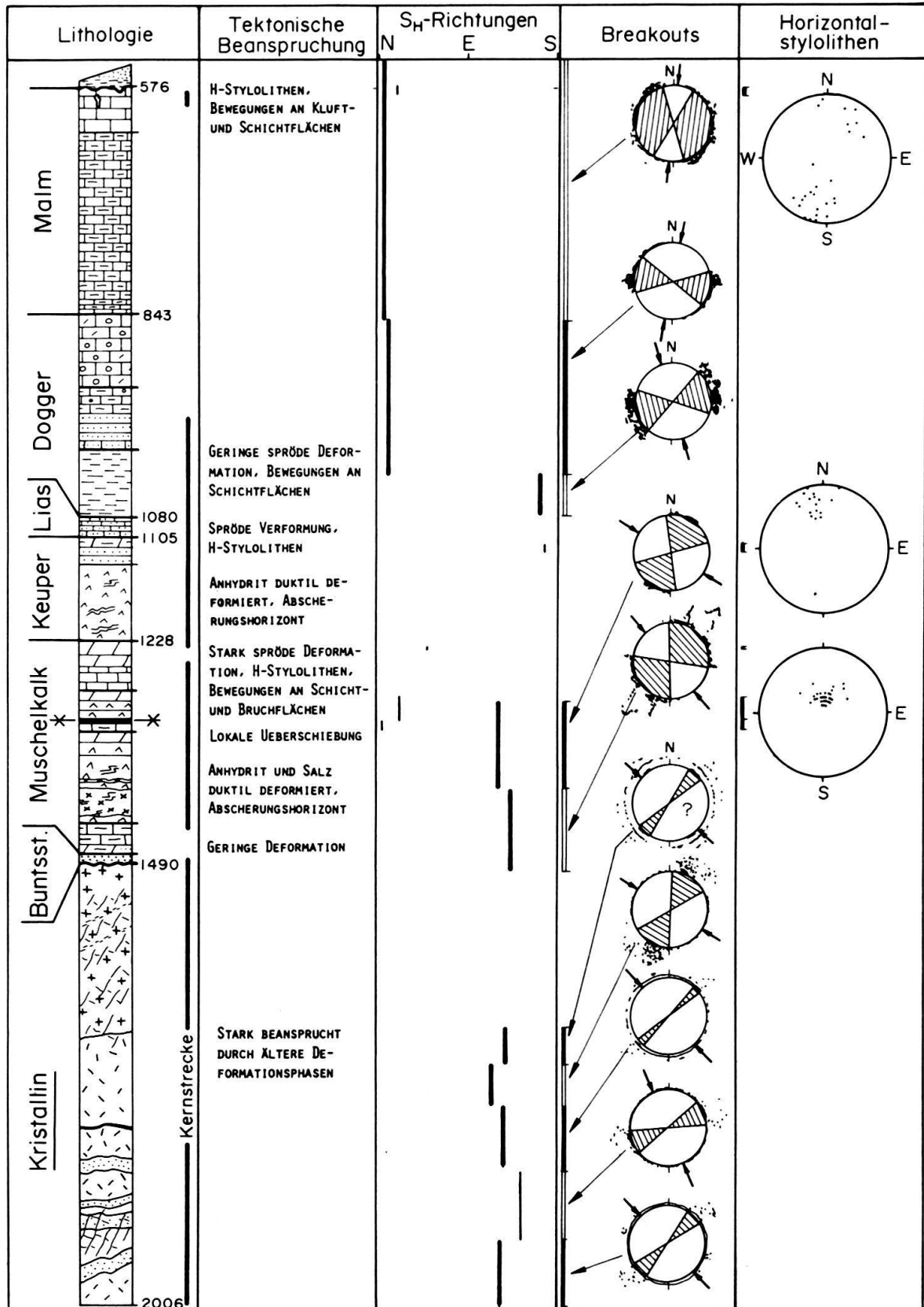


Fig. 3. Tektonische Beanspruchung, Ausbruchsrichtungen und Lage der Horizontalstylolithen in der Bohrung Schafisheim.

S_H -Richtungen: — Spannungsrichtungen abgeleitet aus Breakouts, - - - Spannungsrichtungen abgeleitet aus Horizontalstylolithen.

Breakouts: Schraffierte Flächen bedeuten beobachtete Ausbruchsrichtung.

Horizontalstylolithen: Darstellung der Zapfenrichtungen (untere Halbkugel)

den. Im darunterliegenden Muschelkalk (1230–1478 m) beobachtet man hingegen Richtungen von $45^\circ \pm 10^\circ$.

4. Interpretation

4.1 Beobachtungen zur Jura-Überschiebung in der Bohrung Schafisheim

Die Bohrung Schafisheim liegt südlich vom Faltenjura im ausklingenden Seetal ca. 3 km SW von Lenzburg in der mittelländischen Molasse. Die geologische Situation ist in Figur 2 dargestellt, welche aufgrund der reflexionsseismischen Untersuchungen der Nagra (SPRECHER & MÜLLER 1986) und der Daten aus der Bohrung konstruiert wurde.

Der Faltenjura ist ein Kind der Alpen. Er ist durch einen aktiven Schub aus den Alpen entstanden, bei welchem das gesamte mittelländische Sedimentpaket über einen oder mehrere duktile Abscherhorizonte geglitten ist. Diese Hypothese (BUXTORF 1916, UMBGROVE 1948, LAUBSCHER 1961, MÜLLER & HSÜ 1980) kann anhand der Daten aus der Bohrung Schafisheim (Fig. 3) bestätigt werden, denn diese Bohrung ist die erste Bohrung

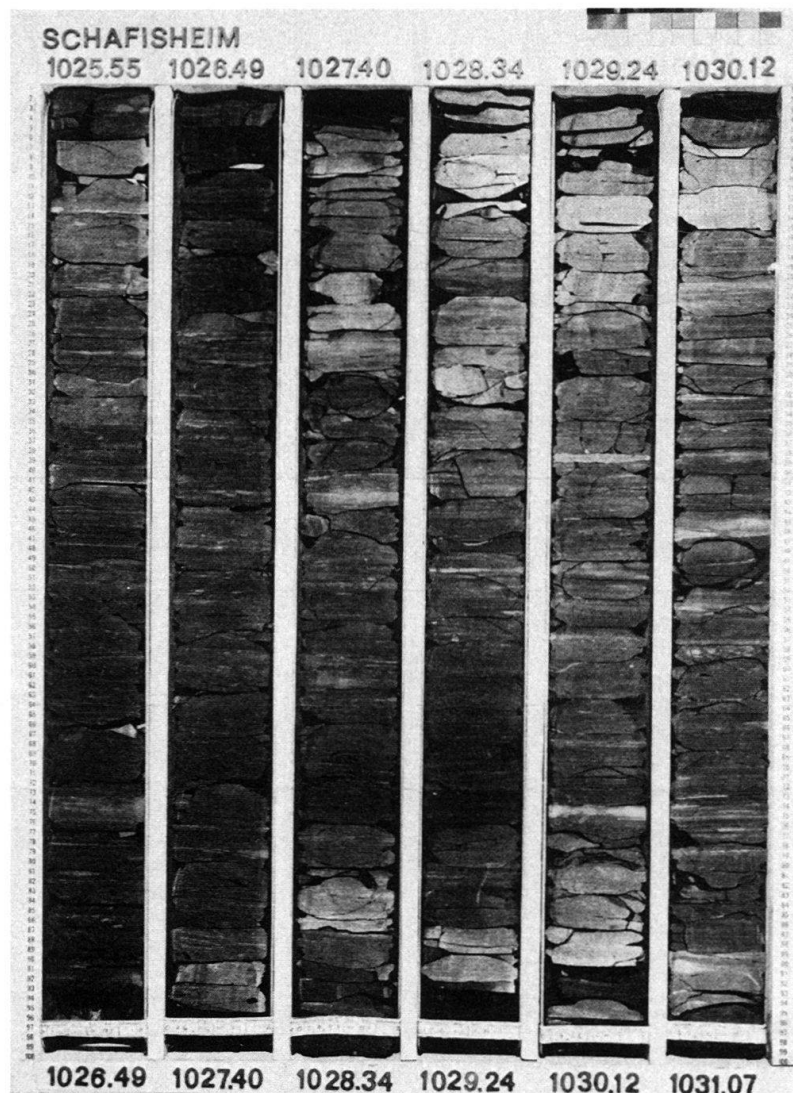


Fig. 4. Der Opalinus-Ton in der Bohrung Schafisheim, geringfügige tektonische Beanspruchung

im Mittelland, in welcher die in Frage kommenden Abscherungshorizonte gekernt und auf ihre Deformation hin untersucht wurden.

Der oberste mögliche Abscherungshorizont ist der Opalinus-Ton. In ihm konnten jedoch nur geringfügige Deformationen erkannt werden (Fig. 4). Seine Bedeutung als Abscherhorizont ist daher zweifelhaft, zumal ähnliche geringfügige Verformungen auch im Opalinus-Ton der Bohrungen im Tafeljura (Riniken, Weiach) beobachtet werden konnten.

Der nächst tieferliegende mögliche Abscherungshorizont ist der Gipskeuper. Dieser zeigt intensive Deformationen (Fig. 5) in den anhydritischen Partien. Eindeutig kann man feststellen, dass sich der Anhydrit gegenüber den tonigen Partien viel inkompetenter, duktiler verhielt. Tonige Horizonte innerhalb der anhydritischen Partien sind zerrissen und boudiniert. Diese Beobachtungen stehen in Übereinstimmung mit den experimentellen Untersuchungen an Tonen (NÜESCH, in Vorbereitung). Dadurch wird verständlich, warum der Opalinus-Ton keinen Abscherungshorizont darstellen konnte. Auch in der

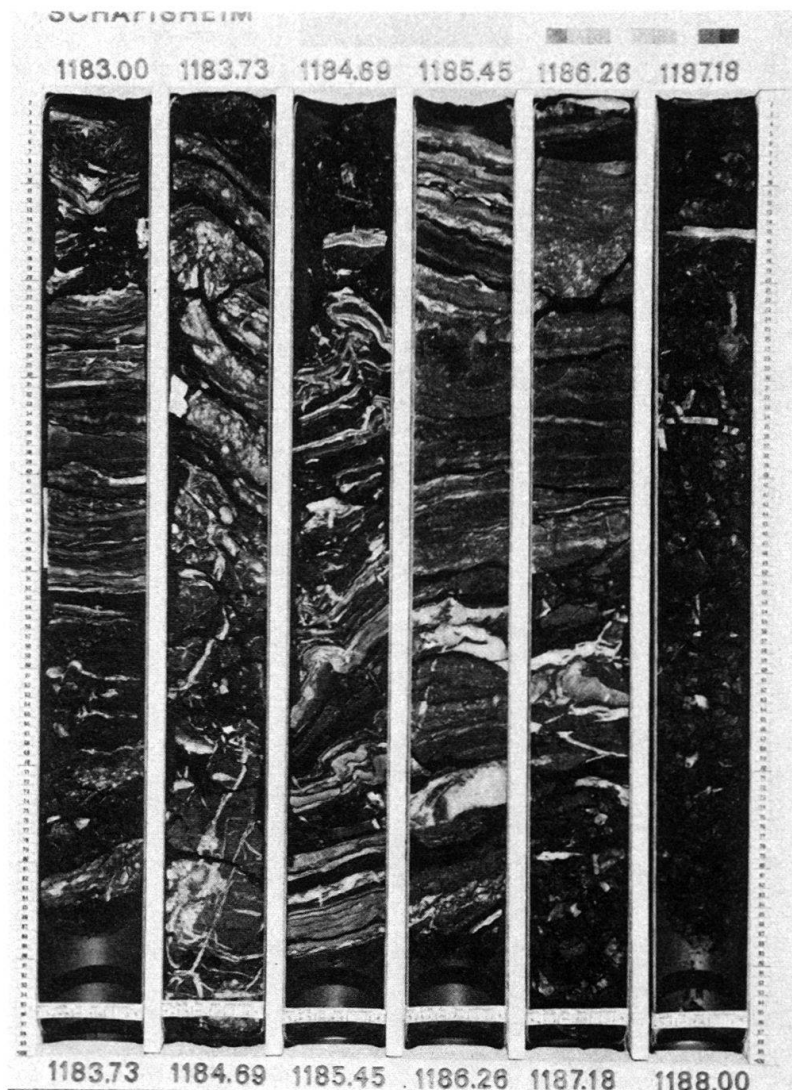


Fig. 5. Unterschiedliches Deformationsverhalten der anhydritisch-tonigen Partien im Keuper der Bohrung Schafisheim

Bohrung Altishofen wurde festgestellt, dass der Keuper starke Verformungen aufwies. MÜLLER et al. (1980) interpretierten diese Verformungen als Auswirkung der Jura-Überschiebung, während FISCHER & LUTERBACHER keine tektonischen Ursachen für diese Verformungen annahmen.

Der karbonatische Teil des Muschelkalkes, welcher gleitbrettartig zwischen den duktilen evaporitischen Serien des Keupers und der Anhydritgruppe schwimmt, ist zerbrochen und überschoben (Fig. 2 und 3).

Den grössten Teil der Verformung, der durch die Überschiebung verursacht wurde, hat der Mittlere Muschelkalk aufgenommen. Erstaunlich ist dabei, dass trotz der Anwesenheit von über 30 m mächtigen sehr duktilen Salzen (JORDAN 1986) auch der Anhydrit intensiv verformt ist (Fig. 6). Möglicherweise ist Salz nur lokal vorhanden (lokale Becken), sonst müsste man annehmen, dass es den grössten Teil der Überschiebung hätte aufnehmen müssen, die bei Schafisheim 4–5 km betragen dürfte.

Die Bestätigung der Abscherung des Deckgebirges vom Grundgebirge wird jedoch nicht nur anhand der deformierten Sedimente des Muschelkalkes und des Keupers

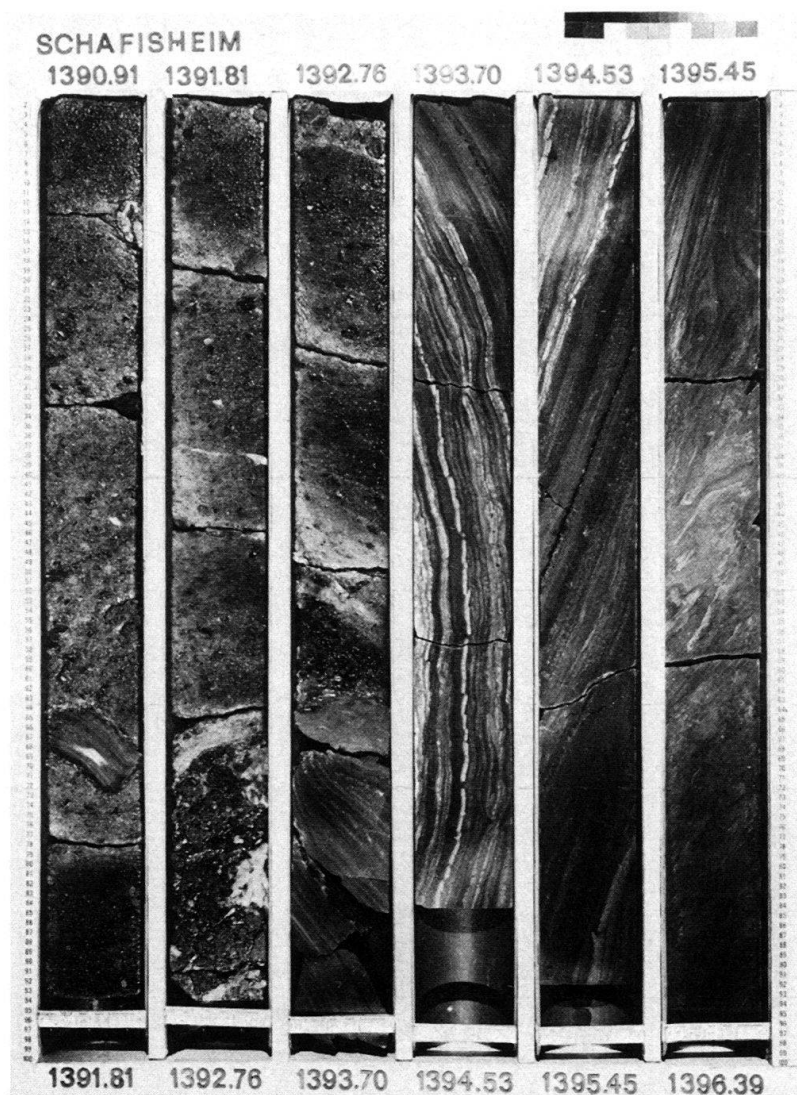


Fig. 6. Intensiv duktil deformierter Anhydrit und Salz im Mittleren Muschelkalk der Bohrung Schafisheim

demonstriert, sondern sehr eindrücklich auch durch die Richtungsänderung des Spannungsfeldes in der Bohrung Schafisheim (Fig. 3).

Die Paläospannungsmessungen, die an Horizontal-Stylolithen im Faltenjura (MEIER 1984) durchgeführt wurden, ergaben ein Richtungsmaximum zwischen 0° und 15° . Die in-situ Spannungsmessungen (S_H $14^\circ \pm 14^\circ$) im Tafeljura bei Häfelfingen (BECKER et al. 1987), welches noch im Einflussbereich des Faltenjuras liegt, zeigen ebenfalls diese generelle Richtung (Tab. 1). Diese Orientierung des Spannungsfeldes kann nun in der Bohrung Schafisheim (Fig. 3) einerseits anhand der Messungen an H-Stylolithen im Malm und andererseits an den Bestimmungen der Bohrlochrandausbrüche bestätigt werden.

Die maximale horizontale Spannungskomponente im Grundgebirge weist eine generelle Richtung von ca. $135^\circ \pm 15^\circ$ auf (Fig. 7). Diese allgemeine Richtung erhält man sowohl aus den Bestimmungen der Bohrlochrandausbrüche in den Tiefbohrungen der Nagra (BECKER et al. 1984), als auch aus den seismotektonischen Bestimmungen (PAVONI 1984, BONJER & APOPEI 1986).

Zwischen dem Gundgebirge und den über die Abscherungshorizonte gleitenden Sedimenten des Deckgebirges beträgt die Differenz bezüglich der Spannungsrichtung ca. 50° . Diese Drehung des Spannungsfeldes im Gegenuhrzeigersinn kann anhand der Richtungsänderungen der Bohrlochrandausbrüche (Fig. 1 und 3) sehr klar demonstriert werden. Auch die Orientierung der H-Stylolithen im Keuper deutet diese Drehung an. Die Messungen der H-Stylolithen im Muschelkalk scheinen dieser Drehung zu widersprechen. Aufgrund einer lokalen Überschiebung wurden sie in ihrer Lage jedoch sekundär steilgestellt. Dadurch ist die ursprüngliche Lage nicht mehr feststellbar.

Diese Entkopplung des Spannungsfeldes zwischen Deck- und Grundgebirge steht aller Wahrscheinlichkeit nach mit der Jura-Überschiebung in Verbindung und deutet zudem darauf hin, dass diese Überschiebung auch heute noch aktiv ist.

4.2 Die Änderung des Spannungsfeldes an der Kollisionsfront Faltenjura–Tafeljura

Nach der Richtungsbestimmung der H-Stylolithen im östlichen Teil des Tafeljuras (Fig. 8) ist das Paläospannungsfeld gegenüber dem Faltenjura um ca. 30° gedreht (MEIER 1984). Die durchschnittliche Richtung der H-Stylolithen beträgt ca. 170° . Die Messungen ermittelt aus den Bohrlochrandausbrüchen der Bohrungen Böttstein, Weiach, Riniken und Kaisten ergaben Werte für die maximale horizontale Spannungsrichtung von ca. 140° – 160° . Diese Daten zeigen trotz der Abweichungen noch eine recht gute Übereinstimmung mit den Richtungen der H-Stylolithen. Hingegen weisen die in-situ Spannungsmessungen (Tab. 1) von Endingen ($89^\circ \pm 8^\circ$) und von Dielsdorf ($117^\circ \pm 6^\circ$) deutlich abweichende Richtungen auf. Ob hier lokale Störungen wie die Endinger Flexur oder die Lägeren-Überschiebung das Spannungsfeld beeinflussen, kann anhand dieser Daten nicht gesagt werden.

Im westlichen Teil des Tafeljuras und im Rheingraben ist nach den in-situ Spannungsmessungen für die maximale horizontale Spannungskomponente eine N–S-Richtung gegeben. Die Messungen in den Lokationen Zunzgen und Hollwanger Hof folgen diesem Trend nicht. Wahrscheinlich spiegeln diese Messungen lokaltektonische Effekte wider. Beispielsweise kann für die Messungen in Zunzgen ($140^\circ \pm 12^\circ$) mit einer Beeinflussung durch die Wehr–Zeiningen Bruchzone gerechnet werden (BECKER et al. 1987).

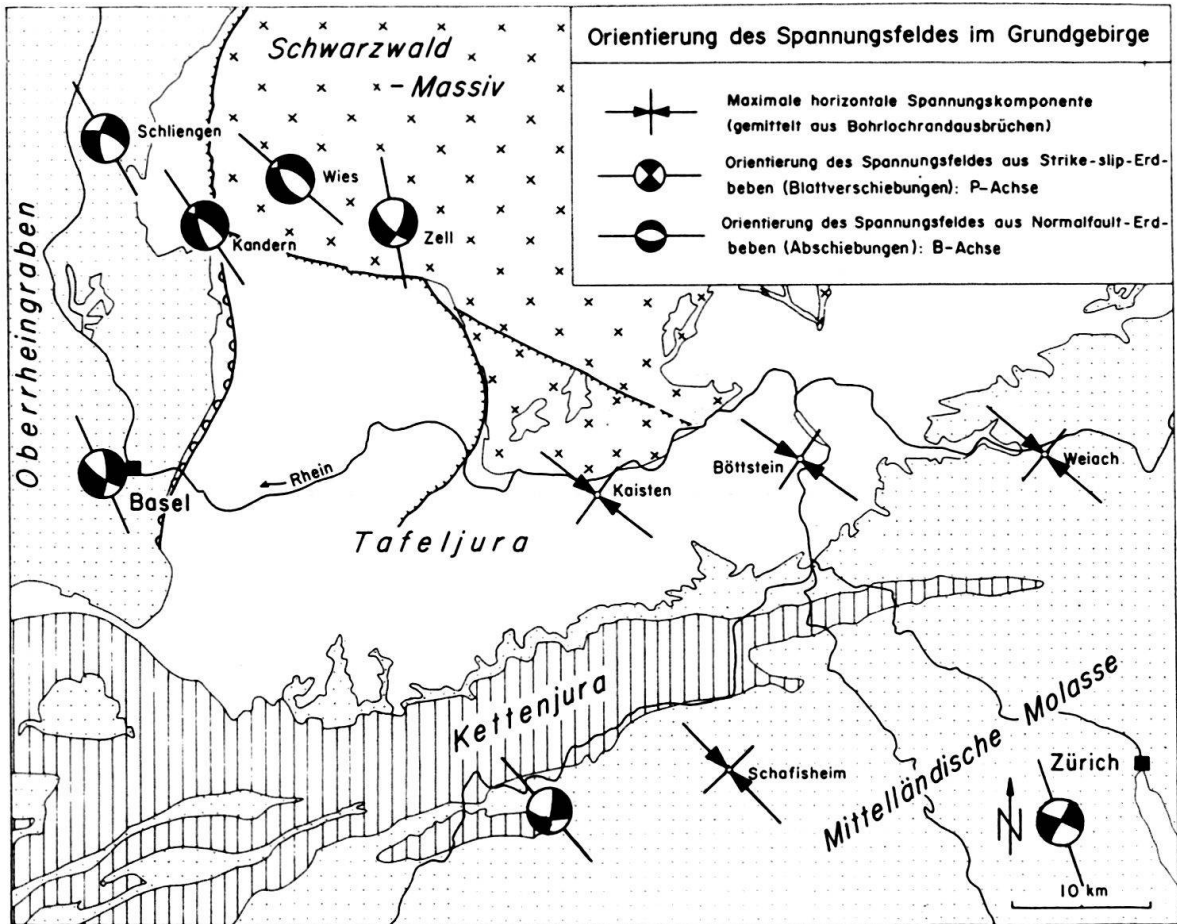


Fig. 7. Überblick über die Orientierung des Spannungsfeldes im Grundgebirge der Nordschweiz

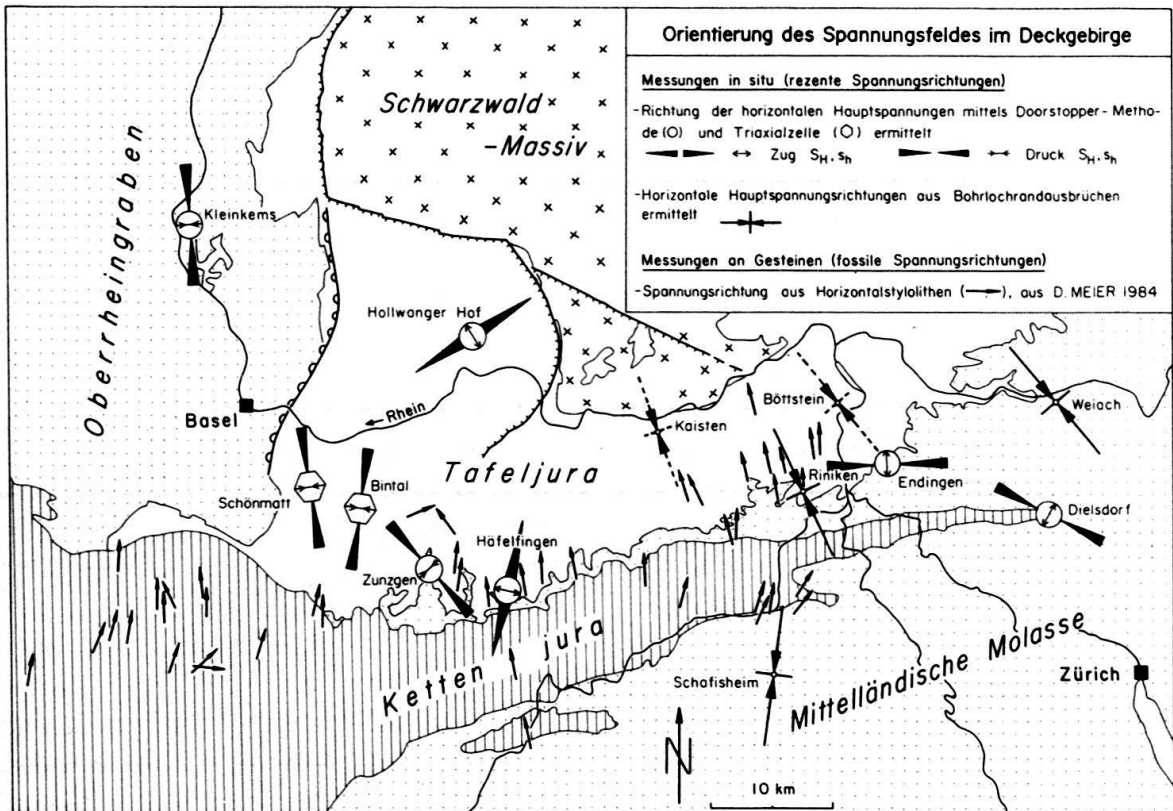


Fig. 8. Überblick über die Orientierung des Spannungsfeldes im Deckgebirge der Nordschweiz

Tabelle 1: Ergebnisse der in-situ Spannungsmessungen im Juragebirge und seiner Umgebung. σ_1 , σ_2 und σ_3 sind die Hauptspannungen des Spannungstensors. S_H und S_h sind die maximalen bzw. minimalen Horizontalspannungen.

Meßlokation	n	Hauptspannungen	Richtungen ($^\circ$) \pm s	Beträge (MPa)
Bintal	4	σ_1	292/88 \pm (38/ 0,4)	1,65
		σ_2	189/ 0,3 \pm (31/ 2)	0,82
		σ_3	99/ 2 \pm (31/ 1)	0,66
Schön matt	2	σ_1	343/87 \pm (17/15)	1,49
		σ_2	172/ 3 \pm (6/14)	0,71
		σ_3	81/ 3 \pm (5/ 3)	0,53
Kleinkems	?	S_H	176 \pm 13	1,9
		S_h	86 \pm 13	1,4
Zunzgen	10	S_H	140 \pm 12	0,22
		S_h	50 \pm 12	0,02
Häfel fingen	8	S_H	14 \pm 14	-0,07
		S_h	104 \pm 14	-0,45
Hollwanger Hof	8	S_H	58 \pm 31	-0,02
		S_h	148 \pm 31	-0,23
Endingen	5	S_H	89 \pm 8	0,22
		S_h	179 \pm 8	-0,04
Dielsdorf	5	S_H	117 \pm 6	0,28
		S_h	27 \pm 6	-0,04

Schlussfolgerungen

Eine Betrachtung der Ergebnisse aus den Bohrlochrandausbrüchen, den in-situ Spannungsmessungen sowie der Vergleich mit den Paläospannungsbestimmungen aus der Lage der Horizontalstylolithen zeigt, dass die Spannungsfelder in verschiedenen tektonischen Elementen (kristallines Grundgebirge, Nordschweizer Permokarbon-Trog, das südlich des Faltenjuras liegende, abgescherte Deckgebirge, Tafeljura, Dinkelberg-Scholle und Oberrhein graben) unterschiedlich sind.

— Im kristallinen Grundgebirge konnte aufgrund der Bohrlochrandausbrüche eine einheitliche Richtung der maximalen Horizontalspannungen von $135^\circ \pm 15^\circ$ ermittelt

- werden. Diese generelle Richtung wird auch weitgehend durch die Ergebnisse der seismotektonischen Untersuchungen (PAVONI 1984, BONJER & APOPEI 1986) bestätigt.
- Im Nordschweizer Permokarbon-Trog ist das Spannungsfeld leicht nach Süden (Richtung der maximalen Horizontalspannung = $160^\circ \pm 10^\circ$) gedreht. Diese Drehung kann durch die Struktur des Troges und das unterschiedliche Materialverhalten der permokarbonischen Sedimente gegenüber den kristallinen Gesteinen erklärt werden (CLAUSS 1987).
 - Für das südlich vom Jura liegende, abgescherte Deckgebirge konnte aufgrund der Bohrlochrandausbrüche zusammen mit den in-situ Spannungsmessungen bei Häfelfingen eine mittlere maximale horizontale Spannungsorientierung von $10^\circ \pm 10^\circ$ ermittelt werden. Diese Richtung stimmt sehr gut mit den Paläospannungsmessungen an H-Stylolithen (MEIER 1984) überein. Die Entkopplung des Spannungsfeldes zwischen Grundgebirge und Deckgebirge liess sich aufgrund von Richtungsänderungen der Randausbrüche und der Lage der H-Stylolithen in der Bohrung Schafisheim nachweisen.
 - Im Deckgebirge des Tafeljuras ist gemäss den H-Stylolithen (MEIER 1984) das Paläospannungsfeld gegenüber dem Spannungsfeld im Grundgebirge um 20° – 30° im Uhrzeigersinn gedreht. Eine noch deutlichere Drehung zeigen die Ergebnisse aus den Randausbruchsanalysen in den Tiefbohrungen (Richtung der maximalen Horizontalspannung $150^\circ \pm 10^\circ$).

Verdankungen

Wir danken Herrn Prof. Dr. K. Fuchs für seine Unterstützung unserer Arbeit, Herrn Dr. M. Ammann für seine kritischen Anregungen, die sorgfältige Anfertigung der Abbildungen und die Durchsicht sowie Frau P. Gerwer für das Schreiben des Manuskripts.

Die beiden Reviewer PD Dr. Pavoni und PD Dr. S. Schmid haben durch ihre kritischen Anmerkungen entscheidend zur Verbesserung der vorliegenden Arbeit beigetragen.

LITERATURVERZEICHNIS

- AHORNER, L. (1975): Present day stress field and seismotectonic block movements along major fault zones in Central Europe. – *Tectonophysics* 29, 223–232.
- BECKER, A., BLÜMLING, P., & MÜLLER, W. H. (1984): Rezentes Spannungsfeld in der zentralen Nordschweiz. – *Nagra Tech. Ber. NTB 84-37*. Nagra, Baden.
- BECKER, A. (1985): Messung und Interpretation oberflächennaher in-situ-Spannungen am Südost-Ende des Oberrheingrabens und im Tafeljura. – *Diss. Univ. Karlsruhe*.
- BECKER, A., BLÜMLING, P., & MÜLLER, W. H. (1987): Recent stress field and neotectonics in the Eastern Jura Mountains – Switzerland. – *Tectonophysics* 135, 277–288.
- BELL, J. S., & GOUGH, D. I. (1979): Northeast–southwest compressive stress in Alberta: evidence from oilwells. – *Earth and Planet. Sci. Lett.* 45, 475–482.
- BLÜMLING, P., FUCHS, K., & SCHNEIDER, T. (1983): Orientation of the stress field from breakouts in a crystalline well in a seismic active area. – *Phys. Earth Plan. Int.* 33, 250–254.
- BLÜMLING, P. (1986): In-situ Spannungsmessungen in Tiefbohrungen mit Hilfe von Bohrlochrandausbrüchen und die Spannungsverteilung in der Kruste Mitteleuropas und Australiens. – *Diss. Univ. Karlsruhe*.
- BONJER, K.-P. (1984): The seismicity of the Rhinegraben system – source parameters, propagation and site effects. In: MELCHIOR, P. (Ed.): *Seismic activity in Western Europe*. – D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht/Boston/London.
- BONJER, K.-P., & APOPEI, I. (1986): The complexity at the seismogenic stress release in the southernmost Rhinegraben and Dinkelberg area. – *Sonderforschungsbereich 108, Karlsruhe, Ber. band. 1984–1986*, 99–104.
- BONJER, K. P., GELBEKE, C., GILG, B., ROULAND, D., MAYER-ROSA, D., & MASSINON, B. (1984): Seismicity and dynamics of the Upper Rhinegraben. – *J. Geophys.* 55, 1–12.

- BUXTORF, A. (1916): Prognosen und Befunde beim Hauensteinbasis- und Grenchenbergtunnel und die Bedeutung der letzteren für die Geologie des Jura gebirges. – Verh. natf. Ges. Basel 27, 184–254.
- CAHNBLEY, H. (1970): Grundlagenuntersuchungen über das Entspannungsbohrverfahren während des praktischen Einsatzes in grosser Teufe. – Diss. Tech. Univ. Clausthal.
- CLAUSS, B. (1987): Numerische Modellierung der Entkopplung tektonischer Spannung in der Nordschweiz (in Vorb.)
- DEICHMANN, N., & RENGGLI, K. (1984): Mikrobeben – Untersuchung Nordschweiz, Teil 2: Seismizität, Jan. 1983–Sept. 1984. – Nagra Tech. Ber. NTB 84-12. Nagra, Baden.
- DIEBOLD, P., & MÜLLER, W. H. (1985): Szenarien der geologischen Langzeitsicherheit. – Nagra Tech. Ber. NTB 84-26. Nagra, Baden.
- FISCHER, H., & LUTERBACHER, H. P. (1963): Das Mesozoikum der Bohrungen Courtion 1 (Kt. Fribourg) und Altishofen 1 (Kt. Luzern). – Beitr. geol. Karte Schweiz (N. F.) 115.
- GOODMAN, R. E., VAN, T. K., & HEUZE, F. E. (1968): The measurement of rock deformability in boreholes. – 10th Symp. Rock Mech. Univ. Texas, Austin, 1–45.
- GUBLER, E., SCHNEIDER, D., & KELLERHALS, P. (1984): Bestimmungen von rezenten Bewegungen der Erdkruste mit geodätischen Methoden. – Nagra Tech. Ber. NTB 84-17. Nagra, Baden.
- HALDIMANN, P., NAEF, H., & SCHMASSMANN, H. (1984): Fluviale Erosions- und Akkumulationsformen als Indizien jungpleistozäner und holozäner Bewegungen in der Nordschweiz und angrenzenden Gebieten. – Nagra Tech. Ber. NTB 84-16. Nagra, Baden.
- ISLER, A. (1984a): Beurteilung der Satellitenbildlineamente im Raume Baden–Frick–Laufenburg–Zürich. – Nagra Tech. Ber. NTB 84-28. Nagra, Baden.
- (1984b): Literaturzusammenstellung zur Neotektonik. – Nagra Tech. Ber. NTB 84-29. Nagra, Baden.
- JORDAN, P. G. (1986): Gefüge-Entwicklung und mechanische Eigenschaften von Zwei-Phasen-Aggregaten (Kalk-Halit) bei experimenteller Deformation. – Diss. ETH-Zürich.
- KIRSCH, G. (1898): Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre. – Z. Ver. dtsch. Ing. 42.
- LAUBSCHER, H. (1961): Die Fernschubhypothese der Jura faltung. – Eclogae geol. Helv. 54/1, 221–282.
- LEEMAN, E. R. (1964): Borehole rock stress measuring instruments, part 2. – J. South Afr. Inst. Min. Metall. 65, 82–114.
- LEEMAN, E. R., & HAYES, D. J. (1966): A technique for determining the complete state of stress in rock using a single borehole. – Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rock Mech., Lisboa, part II, 17–23.
- MASTIN, L. G. (1984): The development of borehole breakouts in sandstone. – Master Thesis Stanford University.
- MAYER-ROSA, D., DIETIKER, M., DEICHMANN, N., RENGGLI, K., BRAENDLI, J., STUDER, J., & RUTISHAUSER, G. (1984): Mikrobeben-Untersuchung Nordschweiz, Teil 1: Technische Unterlagen, Stationsnetz. – Nagra Tech. Ber. NTB 84-11. Nagra, Baden.
- MC GARR, A., & GAY, N. C. (1978): State of stress in the Earth's crust. – Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 6, 405–436.
- MEIER, D. (1984): Zur Tektonik des schweizerischen Tafel- und Faltenjura (regionale und lokale Strukturen, Klüftgenese, Bruch- und Falten tektonik, Drucklösung). – Clausth. Geowiss. Diss. 14.
- MÜLLER, W. H., & HSÜ, K. J. (1980): Stress Distribution in Overthrusting Slabs and Mechanics of Jura Deformation. – Rock Mech. Suppl. 9, 219–232.
- MÜLLER, W. H., BRIEGEL, U., & BAUMANN, W. (1980): Anhydrit als mögliches Wirtgestein für die Lagerung radioaktiver Abfälle. – Eidg. Inst. Reaktorforschung, Bericht Nr. 409.
- NAEF, H., DIEBOLD, P., & SCHLANKE, S. (1985): Sedimentation und Tektonik im Tertiär der Nordschweiz. – Nagra Tech. Ber. NTB 85-14. Nagra, Baden.
- NÜESCH, R. (in Vorb.): Felsmechanische Untersuchungen an Opalinus-Ton. – Diss. ETH Zürich.
- PAVONI, N. (1984): Seismotektonik Nordschweiz. – Nagra Tech. Ber. NTB 84-45. Nagra, Baden.
- SCHNEIDER, T. (1985): Bohrlochrandausbrüche in norddeutschen Bohrungen und ihre Beziehung zum regionalen Spannungsfeld – Beobachtung und Theorie. – Dipl.-Arb. Univ. Karlsruhe (unveröff.).
- SPRECHER, CH., & MÜLLER, W. H. (1986): Geophysikalische Untersuchungen in der Nordschweiz: Reflexionsseismik 1982. – Nagra Tech. Ber. NTB 84-15. Nagra, Baden.
- UMBROVE, J. H. F. (1948): Origin of the Jura Mountains. – Proc. K. nederl. Akad. Wetensch. 51, 1049–1062.
- WAGNER, G. H. (1964): Kleintektonische Untersuchungen im Gebiet des Nördlinger Rieses. – Geol. Jb. 81, 519–600.
- ZOBACK, M. D., MOOS, D., MASTIN, L., & ANDERSON, R. (1985): Well bore breakouts and in-situ stress. – J. Geophys. Res. 90, 5523–5530.

Manuskript eingegangen am 9. Februar 1987

Revision angenommen am 7. April 1987

