

Nagra

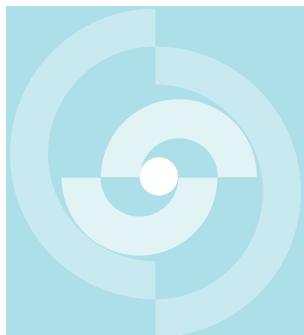
Nationale
Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Cédra

Société coopérative
nationale
pour l'entreposage
de déchets radioactifs

Cisra

Società cooperativa
nazionale
per l'immagazzinamento
di scorie radioattive



TECHNISCHER BERICHT 84-37

Rezentes Spannungsfeld in der zentralen
Nordschweiz

A. Becker¹⁾
P. Blümling²⁾
W. H. Müller³⁾

September 1984

- ¹⁾ Geologisches Institut der Universität Karlsruhe
²⁾ Geophysikalisches Institut der Universität Karlsruhe
³⁾ Nagra, CH-5401 Baden

Nagra

Nationale
Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Cédra

Société coopérative
nationale
pour l'entreposage
de déchets radioactifs

Cisra

Società cooperativa
nazionale
per l'immagazzinamento
di scorie radioattive

TECHNISCHER BERICHT 84-37

Rezentes Spannungsfeld in der zentralen
Nordschweiz

A. Becker¹⁾
P. Blümling²⁾
W. H. Müller³⁾

September 1984

¹⁾ Geologisches Institut der Universität Karlsruhe
²⁾ Geophysikalisches Institut der Universität Karlsruhe
³⁾ Nagra, CH-5401 Baden

I Zusammenfassung

Im Bereich der zentralen Nordschweiz wurde mit Hilfe der Doorstopper-Methode und dem Verhalten von Randausbrüchen in Tiefbohrungen das regionale Spannungsfeld und seine räumlichen Variationen bestimmt und mit Herdflächenlösungen von Erdbeben aus dieser Region verglichen.

Es zeigte sich, daß in diesem Gebiet am südöstlichen Ende des Rheingrabens starke laterale Inhomogenitäten des Spannungsfeldes auftreten. Die für weite Teile Mitteleuropas bekannte Hauptspannungsrichtung von $N140^{\circ}E+10^{\circ}$ wurde in der Nordschweiz oberflächennah nur einmal gemessen. Alle anderen in-situ Spannungsmessungen zeigten Abweichungen bis zu 80° von dieser generellen Richtung. Die Bestätigung der Spannungsumlagerung an der Oberfläche zeigt die Untersuchung der Bohrlochrandausbrüche in Tiefbohrungen der zentralen Nordschweiz. In den Sedimenten des Permokarbons (N $160^{\circ}E+10^{\circ}$) und in den Sedimenten oberhalb des Abscherungshorizontes der Juraüberschiebung (N $7^{\circ}E+10^{\circ}$) werden andere Spannungsrichtungen gemessen als im kristallinen Grundgebirge.

Die generelle Richtung des Spannungsfeldes ($N140^{\circ}E+10^{\circ}$) wird in der Nordschweiz nahezu ausschließlich im kristallinen Grundgebirge gemessen. Damit ist zum erstenmal eine Drehung der horizontalen Hauptspannungsrichtung mit der Tiefe beobachtet worden, die auf eine mechanische Entkopplung des Grundgebirges von dem überschobenen Deckgebirge hinweist.

Auf dem Dinkelberg werden oberflächennah Zugspannungen beobachtet, die durch Betrag und Richtung die Herdmechanismen der Abschiebungsbeben im Bereich Wies und Kandern bestätigen.

I Zusammenfassung

Im Bereich der zentralen Nordschweiz wurde mit Hilfe der Doorstopper-Methode und dem Verhalten von Randausbrüchen in Tiefbohrungen das regionale Spannungsfeld und seine räumlichen Variationen bestimmt und mit Herdflächenlösungen von Erdbeben aus dieser Region verglichen.

Es zeigte sich, daß in diesem Gebiet am südöstlichen Ende des Rheingrabens starke laterale Inhomogenitäten des Spannungsfeldes auftreten. Die für weite Teile Mitteleuropas bekannte Hauptspannungsrichtung von $N140^{\circ}E+10^{\circ}$ wurde in der Nordschweiz oberflächennah nur einmal gemessen. Alle anderen in-situ Spannungsmessungen zeigten Abweichungen bis zu 80° von dieser generellen Richtung. Die Bestätigung der Spannungsumlagerung an der Oberfläche zeigt die Untersuchung der Bohrlochrandausbrüche in Tiefbohrungen der zentralen Nordschweiz. In den Sedimenten des Permokarbons (N $160^{\circ}E+10^{\circ}$) und in den Sedimenten oberhalb des Abscherungshorizontes der Juraüberschiebung (N $7^{\circ}E+10^{\circ}$) werden andere Spannungsrichtungen gemessen als im kristallinen Grundgebirge.

Die generelle Richtung des Spannungsfeldes ($N140^{\circ}E+10^{\circ}$) wird in der Nordschweiz nahezu ausschließlich im kristallinen Grundgebirge gemessen. Damit ist zum erstenmal eine Drehung der horizontalen Hauptspannungsrichtung mit der Tiefe beobachtet worden, die auf eine mechanische Entkopplung des Grundgebirges von dem überschobenen Deckgebirge hinweist.

Auf dem Dinkelberg werden oberflächennah Zugspannungen beobachtet, die durch Betrag und Richtung die Herdmechanismen der Abschiebungsbeben im Bereich Wies und Kandern bestätigen.

II Abstract

The regional stress field and its local variation were detected for the northern part of Central Switzerland using an overcoring technique (doorstopper) and the observation of breakouts in deep boreholes. The results were compared with fault plane solutions of earthquakes.

In this area at the south-eastern end of the Rhinegraben, the stress field is very inhomogeneous. The general direction of the mean stress in Central Europe ($N140^{\circ}E \pm 10^{\circ}$) was observed at only one location in the case of the overcoring measurements. All other in-situ (overcoring) measurements are up to 80° off this general direction. These changes of the state of stress near the surface were confirmed by the directions of borehole breakouts in deep wells. The spalling of the borehole wall indicates a stress direction of $N160^{\circ}E \pm 10^{\circ}$ within a sediment trough and $N7^{\circ}E \pm 10$ in the sediments on the top of the shearplane of the Jura overthrust. The general direction of the European stress field was measured exclusively in the crystalline basement. This is the first time that a rotation of stress direction with depth has been observed directly. The data indicate the mechanical decoupling of the basement and the sediments.

In the area of the Dinkelberg the data of the overcoring measurements show tensile stresses which are in agreement with results of the faultplane solution of normal-fault earthquakes in the area of Wies and Kandern.

III Resumé

Le champs de contrainte mécanique régional dans la partie centrale du nord de la Suisse, ainsi que ses variations spatiales, ont été l'objet d'une évaluation par la méthode de Doorstopper grâce à l'observation du comportement des fissures observables à la surface de la paroi dans les forages; une comparaison a été faite avec le mécanisme du foyer des séismes dans cette région.

On a pu montrer qu'une grande hétérogénéité latérale du champs de contrainte mécanique, se manifeste dans cette région située à l'extrémité sud-est de la fosse rhénane. La direction des contraintes mécaniques maximales, mesurée sur une grande partie de l'Europe centrale dans la direction $N140^{\circ}E+10^{\circ}$, n'a été observée qu'une fois en Suisse dans les couches superficielles. Toutes les autres mesures faites sur place ont montré des déviations allant jusqu'à 80° par rapport à cette direction générale. L'examen des fissures observables sur les parois des forages de la partie centrale du nord de la Suisse confirme la disposition du champs de contrainte mécanique près de la surface.

Dans les sédiments de l'auge carbonifère on a mesuré $N160^{\circ}E+10^{\circ}$ et dans ceux qui sont situés au-dessus de la surface de cisaillement de la faille jurassique $N7^{\circ}E+10^{\circ}$; ces valeurs de direction du champs de contrainte sont différentes de celles mesurées dans le socle cristallin.

La direction générale de ce champs dans le nord de la Suisse ($140^{\circ}E+10^{\circ}$) n'est mesurée, presque exclusivement, que dans le socle cristallin. Une rotation de sa composante horizontale maximale, en fonction de la profondeur, est ainsi observée pour la première fois. Celle-ci indique un découplage entre le socle et les couches de couverture chevauchant celui-ci.

Des contraintes de tension sont observées près de la surface au Dinkelberg; celles-ci confirment en amplitude et direction les mécanismes du foyer des séismes ayant pour origine ces contraintes de tension dans la région de Wies et Kandern.

IV Inhaltsverzeichnis

I	Zusammenfassung	I
II	Abstract	II
III	Resumé	III
IV	Inhaltsverzeichnis	IV
V	Figurenverzeichnis	V
1.	Einleitung	1
2.	In-situ Spannungsmessungen nach der Doorstopper-Methode	2
2.1	Erläuterung zur Meßmethode	2
2.1.1	Ausführung einer Doorstopper-Messung	2
2.1.2	Bestimmung der elastischen Gesteinsparameter	3
2.1.3	Auswertung der Meßergebnisse	4
2.2	Ergebnisse der in-situ Spannungsmessungen	5
2.2.1	Steinbruch Kleinkems	5
2.2.2	Steinbruch Zunzgen	6
2.2.3	Steinbruch Häfelfingen	7
2.2.4	Steinbruch Hollwanger Hof	8
2.3	Interpretation der in-situ Spannungsmessungen	9
3.	Ergebnisse aus Bohrlochrandausbrüchen in Bohrungen der NAGRA	11
3.1	Meßprinzip der Bohrlochrandausbrüche	11
3.2	Theorie der Bohrlochrandausbrüche	12
3.3	Kaliberdaten der Bohrungen	16
3.3.1	Bohrung Böttstein	16
3.3.2	Bohrung Weiach	16
3.3.3	Bohrung Riniken	19
3.3.4	Bohrung Schafisheim	19
3.3.5	Bohrung Kaisten	19
3.4	Interpretation der Bohrlochausbrüche	22
3.4.1	Abhängigkeit des Ausbruchsazimuts von der Stratigraphie	22
3.4.2	Tiefenabhängigkeit des Ausbruchsazimuts	22
3.4.3	Räumliche Verteilung der Ausbrüche	26
4.	Schlußfolgerungen	30
5.	Literaturverzeichnis	31
6.	Liste der Abkürzungen	34

V Figurenverzeichnis

Fig. 1	Meßprinzip einer Doorstopper-Messung	3
Fig. 2	Ergebnisse der Doorstopper-Messungen in Zunzgen	6
Fig. 3	Ergebnisse der Doorstopper-Messungen in Häfelfingen	7
Fig. 4	Ergebnisse der Doorstopper-Messungen in Hollwanger Hof	8
Fig. 5	Lage der Spannungsmeßpunkte in der Umgebung Basels	9
Fig. 6	Prinzip der Vierarmkaliber-Auswertung	11
Fig. 7	Theoretisch berechneter Bohrlochrandausbruch aufgrund der Spannungsumlagerung am Bohrloch	12
Fig. 8	Bruchverhalten von Gesteinen im Triaxialversuch	13
Fig. 9	Bruchausbreitung in der Nähe der Bohrlochwand (schematisch)	14
Fig. 10	Beispiel für die Auswertung von Daten des akustischen Televiewers	15
Fig. 11	Beispiel für die Auswertung von Daten der Vierarmkaliber-Messung	17
Fig. 12	Beispiel für die Drehung der Ausbruchsrichtung mit der Tiefe	18
Fig. 18	Vergleich von Ausbrüchen in verschiedenen Gesteinen	18
Fig. 14	Kaliberdaten der Bohrung Kaisten	20
Fig. 15	Statistische Auswertung der Kaliberdaten in der Bohrung Kaisten	21
Fig. 16	Vergleich der Standardauswertung und der statistischen Auswertung	21
Fig. 17	Ausbruchsrichtungen von 5 Bohrungen in der Nordschweiz als Funktion der Tiefe	23
Fig. 18	Ausbruchsrichtungen von 5 Bohrungen in der Nordschweiz als Funktion der Stratigraphie	24
Fig. 19	Vergleich der Ausbruchsrichtungen verschiedener Tiefenbereiche	25

Fig. 20	Dünnschliffaufnahme eines Labor-Bohrloch- randausbruch-Tests	26
Fig. 21	Vergleich der Hauptspannungsrichtungen aus in situ Messungen mit Herdflächenlösungen von Erdbeben	27
Fig. 22	Ergebnis der Bohrlochrandausbruchsuntersu- chung in 5 Bohrungen in der Nordschweiz	28

1. Einleitung

Im Rahmen des Untersuchungsprogramms Nordschweiz hat die NAGRA in all ihren Tiefbohrungen eine Analyse der Bohrlochrandausbrüche zur Ermittlung des rezenten Spannungsfeldes durch das Geophysikalische Institut der Universität Karlsruhe durchführen lassen, deren Ergebnisse in diesem Bericht zusammenfassend dargestellt sind. Die in-situ Spannungsmessungen mit der Doorstopper-Methode wurden der NAGRA freundlicherweise vom Geologischen Institut der Universität Karlsruhe zur Verfügung gestellt.

Die zentrale Nordschweiz ist aufgrund ihrer Lage am Süden des Rheingrabens und im Bereich der Juraüberschiebung und dem weitgehend nicht alpin deformierten Tafeljura ein tektonisch interessantes Untersuchungsgebiet. Von Bedeutung sind dabei nicht nur die Struktur der oberen Erdkruste, Schichtmächtigkeiten und physikalische Parameter der Gesteine, sondern auch das regionale Spannungsfeld dem die Erdkruste ausgesetzt ist und das zu Erdbeben und Reaktivierung von Bruchsystemen führen kann. Kenntnisse über das rezente Spannungsfeld sind für die Interpretation der Neotektonik und somit auch für zukünftige strukturelle Entwicklungen eines Gebietes von großer Bedeutung.

Zur Messung dieser tektonischen Spannungen wurde in den letzten Jahren eine Reihe von Methoden entwickelt. Zwei dieser Methoden werden zur Zeit an der Universität Karlsruhe angewandt und verbessert: am Geologischen Institut das Überbohrverfahren (Doorstopper-Methode) und am Geophysikalischen Institut die Methode der Bohrlochrandausbrüche. Diese beiden Methoden ergänzen einander; mit der einen Methode werden die Spannungen in geringer Tiefe bestimmt, während die zweite eine Untersuchung der tektonischen Spannungen in größerer Tiefe erlaubt.

Ziel dieser Untersuchungen ist es, die Inhomogenität des Spannungsfeldes in diesem tektonisch komplizierten Gebiet zu erfassen und die lokalen Spannungsänderungen zu orten.

2. In-situ Spannungsmessungen nach der Doorstopper-Methode

2.1 Erläuterung zur Meßmethode

Die Doorstopper-Methode, ein Überbohrverfahren, daß von LEEMAN (1971) und CAHNBLEY (1970) entwickelt worden ist, zählt heute zu den gebräuchlichsten Spannungsmeßverfahren. Es handelt sich dabei um eine Meßzelle (sog. Doorstopper) mit vier Dehnungsmeßstreifen (DMS), die jeweils um 45° zueinander versetzt angeordnet sind. Wird ein solcher Doorstopper auf Gestein aufgeklebt und überbohrt, so können die Deformationen des Gesteins über die Längenänderung der Dehnungsmeßstreifen gemessen werden. Die mechanischen Deformationen der vier Dehnungsmeßstreifen lassen sich elektronisch über die Änderung des elektrischen Widerstandes infolge der Verlängerung oder Verkürzung der DMS ermitteln. Streng genommen sind daher Doorstopper-Messungen keine Spannungsmessungen, sondern Deformationsmessungen. Erst die Ermittlung der Gesteinsparameter E (Elastizitätsmodul) und ν (Poissonzahl) ermöglicht die Berechnung der Spannungen. Eine genaue Beschreibung der Theorie dieses Meßverfahrens findet sich bei LEEMAN (1971) und BAUMANN (1982).

2.1.1 Ausführung einer Doorstopper-Messung

Um den ebenen Spannungszustand mit Hilfe von Doorstoppern bestimmen zu können, ist es erforderlich, vertikale Bohrlöcher abzuteufen. In solchen vertikalen Bohrlöchern wurden in Tiefen zwischen 1,25 m und 8,00 m Doorstoppermessungen ausgeführt. Die Bohrlöcher haben einen Durchmesser von 76 mm, sie werden mit diamantbesetzten Bohrkronen abgeteuft. Der Gesteinsstummel, der beim Ziehen des Kernes an der Bohrlochsohle stehen bleibt, wird mit einer diamantbesetzten Platte abgeschliffen. Anschließend wird das ebene Bohrlochende mit einer exzentrisch befestigten Schleifplatte poliert. Nachdem das Bohrloch gesäubert und getrocknet worden ist, wird der Doorstopper mit einer speziellen temperaturkompensierenden Setzeinrichtung in das Bohrloch eingebracht und mit einem Spezialkleber auf die Bohrlochsohle aufgeklebt (Fig. 1). Nach Verfestigung des Klebers wird eine Nullmessung für alle vier DMS durchgeführt und die Setzeinrichtung anschließend abgezogen. Das Bohrwerkzeug mit Kernrohr und Gestänge wird in das Bohrloch eingebracht und der Doorstopper anschließend überbohrt. Nach dem Ziehen des Bohrwerkzeuges kann dem Kernrohr ein Gesteinskern mit aufgeklebtem Doorstopper entnommen werden. Dieser Kern mit Doorstopper wird an die Setzeinrichtung angeschlossen, die ihrerseits Verbindung zu einer Meßbrücke hat. Die Meßbrückenverstimmung ist proportional zu den Deformationen, die mit den DMS in vier verschiedenen Richtungen gemessen werden. Das Anzeigergerät der Meßbrücke liefert direkt die Deformationen in den vier verschiedenen Richtungen.

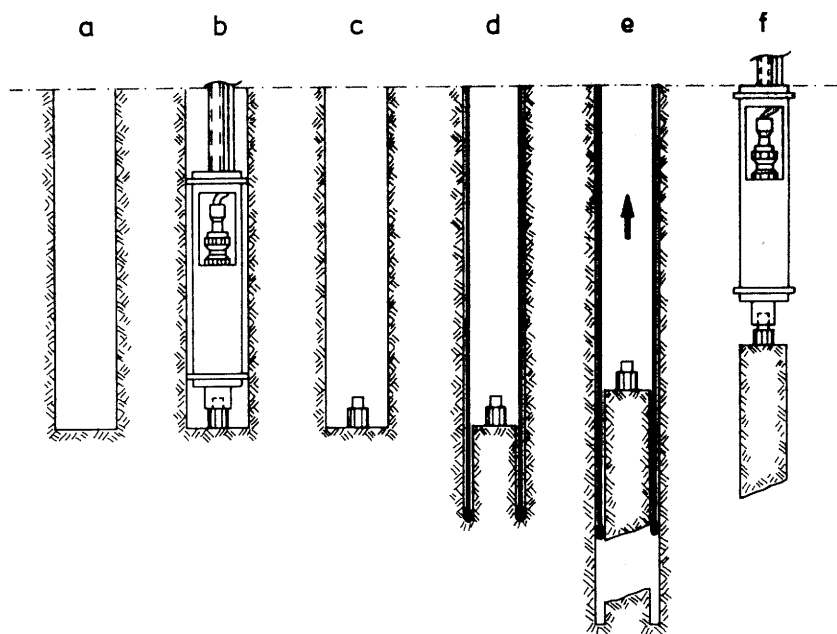


Fig. 1: Ausführung einer Spannungsmessung mit der Doorstopper-Methode. Auf die plangeschliffene, polierte, gesäuberte und getrocknete Bohrlochsohle (a) wird mit Hilfe der Setzeinrichtung ein Doorstopper aufgeklebt (b). Nachdem der Kleber abgebunden ist und eine Nullmessung gemacht worden ist, wird die Setzeinrichtung gezogen (c) und der Doorstopper überbohrt (d). Der Bohrkern mit aufgeklebten Doorstopper wird zusammen mit dem Kernrohr gezogen (e) und wieder an die Setzeinrichtung angeschlossen (f). Nun können die Deformationen des freigeschnittenen Gesteinskerns an der Meßbrücke ermittelt werden.

2.1.2 Bestimmung der elastischen Gesteinsparameter

Sollen aus den gemessenen Deformationen die Spannungen berechnet werden, so ist die Kenntnis des Elastizitätsmoduls E und der Poissonzahl ν notwendig. Der Elastizitätsmodul E wird mit der Goodmansonde im Bohrloch und an mehreren zylindrischen Gesteinsproben im einaxialen Druckversuch bestimmt. Jedoch nur der aus den Goodmansondenmessungen gewonnene Elastizitätsmodul E_G wird zur Berechnung der Spannungen herangezogen.

Eine Goodmansonde ist ein steifer Stahlzylinder mit zwei beweglichen Platten, die hydraulisch gegen die Bohrlochwand gedrückt werden. Das Auseinandergehen der beiden Druckplatten bei steigendem Druck kann am oberen und unteren Ende der beiden Platten gemessen werden. Der Elastizitätsmodul berechnet sich dann aus (GOODMAN et al., 1968):

$$E_G = \frac{\Delta Q}{\Delta u_\alpha / d} \quad K(\nu, \beta)$$

ΔQ = hydraulische Drucksteigerung

Δu_α = mittlere diametrale Verschiebung in Abhängigkeit von ΔQ

d = Bohrlochdurchmesser

$K(\nu, \beta)$ = Konstante, Werte vgl. GOODMAN et al. (1968)

Zahlreiche Messungen zeigen, daß der mit der Goodmansonde bestimmte Elastizitätsmodul E_G fünf- bis sechsmal kleiner ist, als der aus dem einaxialen Druckversuch bestimmte.

Aus dem einaxialen Druckversuch läßt sich das zur Berechnung der Poissonzahl ν erforderliche Verhältnis der Querdehnung zur Längsdehnung bestimmen.

2.1.3 Auswertung der Meßergebnisse

Es ist das Ziel der Auswertung, den ebenen Hauptspannungszustand aus den ermittelten Deformationswerten, dem Elastizitätsmodul E_G und der Poissonzahl ν zu berechnen. Jede Doorstoppermessung muß mindestens drei Deformationswerte liefern, damit eine Berechnung der Hauptdeformationen ϵ_H und ϵ_h möglich ist. Da normalerweise pro Doorstoppermessung vier strain-Werte vorliegen, ist es möglich, insgesamt mit vier verschiedenen Kombinationen die Hauptdehnungen ϵ_H und ϵ_h und die Hauptdeformationsrichtungen θ_H und θ_h zu berechnen. Liegen die aus den vier Kombinationsmöglichkeiten einzeln ermittelten Hauptdeformationsrichtungen nahe beieinander, so kann davon ausgegangen werden, daß die Messung technisch einwandfrei ist.

Der Gang der Auswertung für eine Kombinationsmöglichkeit sei an dieser Stelle nur kurz skizziert, der genaue Formalismus ist in den Arbeiten von LEEMAN (1971) und BAUMANN (1982) nachzulesen. Bei den Berechnungen wird stets vom Deformationstensor $\underline{\epsilon}$ für den zweidimensionalen Fall ausgegangen, dessen Komponenten ϵ_{xx} , ϵ_{yy} und ϵ_{xy} direkt gemessen worden sind. Um die Hauptdeformationen und die Hauptdeformationsrichtungen zu bekommen, ist es notwendig, die Eigenwerte und Eigenvektoren des Deformationstensors zu bestimmen. Die Eigenwerte liefern die Hauptdeformationen und die Eigenvektoren die Hauptdeformationsrichtungen. Mit dem auf Hauptachsen transformierten Deformationstensor und dem Hooke'schen Gesetz wird der Spannungstensor \underline{S} direkt berechnet. Dieser Spannungstensor liefert die Hauptspannungen S_H und S_h mit $S_H > S_h$.

Am Ende eines Bohrloches treten stets durch Spannungsumlagerungen bedingte Spannungskonzentrationen auf. Somit entsprechen die berechneten Hauptspannungen S_H und S_h noch nicht den im umgebenden Gestein herrschenden Hauptspannungen. Erst eine Korrektur der berechneten Hauptspannungen

S_H und S_h mit Hilfe von Spannungskonzentrationsfaktoren - eine Zusammenstellung verschiedener Spannungskonzentrationsfaktoren findet sich bei LEEMAN (1971) - ermöglicht die Berechnung des primären, im ungestörten Gebirge herrschenden Hauptspannungszustandes aus den durch Spannungsumlagerung gekennzeichneten sekundären Hauptspannungen am Ende eines Bohrloches.

Da für die tektonische Interpretation der Spannungsmeßdaten, insbesondere die Richtungen der Hauptspannungen θ_H , θ_h wichtig sind, ist es erforderlich, die aus den Meßdaten gewonnenen Hauptspannungsrichtungen θ_H , θ_h einem Ausreißer-test zu unterwerfen. Hierzu wird der sogenannte Nalimov-Test verwendet, mit dessen Hilfe ausreißerverdächtige Werte eliminiert werden können. Nähere Angaben zu diesem Ausreißertest finden sich bei KAISER & GOTTSCHALK (1972) und BAUMANN (1982).

2.2 Ergebnisse der in-situ Spannungsmessungen

In der näheren Umgebung von Basel sind seit 1978 vom Geologischen Institut der Universität Karlsruhe vier Doorstopper-Messungen ausgeführt worden. Die Messungen wurden stets auf der untersten Sohle der Steinbrüche durchgeführt.

2.2.1 Steinbruch Kleinkems (TK 1:25000, 8311 Lörrach; 3389625/5283225)

In seiner Dissertation publizierte GREINER (1978) die Meßergebnisse aus dem Steinbruch Kleinkems. In diesem Steinbruch, der im Gebiet des Isteiner Klotzes liegt, wurden die Messungen im Rauracium-Korallenkalk (Oxfordium) ausgeführt. Sie zeigten folgende Ergebnisse (Fig. 5):

Richtung der größten horizontale Hauptspannung S_H : $\theta_H = 176^\circ$ ($T = \pm 13^\circ$)

Richtung der kleinsten horizontalen Hauptspannung S_h : $\theta_h = 86^\circ$ ($T = \pm 13^\circ$)

Betrag der größten Hauptspannung S_H :
 $S_H = 1,9$ MPa

Betrag der kleinsten Hauptspannung S_h :
 $S_h = 1,4$ MPa

Betrag der max. Schubspannung $\tau_{max.}$:
 $\tau_{max.} = 0,3$ MPa

Der mit der Goodmansonde bestimmte Elastizitätsmodul E_G betrug:

$$E_G = 19100 \text{ MPa.}$$

2.2.2 Steinbruch Zunzgen (TK 1:25000, 1068 Sissach;
628000/254750)

Der Steinbruch Zunzgen, ca. 2,4 km südlich von Sissach gelegen, ist im Haupttrogenstein (Bajocium-Bathonium) aufgefahen worden. In 6 Bohrlöchern mit Abständen zwischen 15 und 30 m von der Steinbruchwand konnten in Tiefen zwischen 1,25 m und 4,13 m insgesamt 15 technisch einwandfreie Doorstopper-Messungen ausgeführt werden. Mit Hilfe des Nalimov-Testes konnte ein Meßwert als Ausreißer identifiziert werden. Die verbliebenen 14 Werte lieferten folgende Ergebnisse (Fig. 2):

$$\theta_H = 138^\circ \quad (T = \pm 40^\circ; s = \pm 33; p = 75\%; n = 14)$$

$$\theta_h = 48^\circ$$

$$S_H = 0,24 \text{ MPa}$$

$$S_h = 0,10 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{max.}} = 0,07 \text{ MPa}$$

Der mit der Goodmansonde bestimmte Elastizitätsmodul E_G , also der Elastizitätsmodul, der zu der Berechnung der Spannungen herangezogen wurde, betrug:

$$E_G = 5500 \text{ MPa.}$$

Im Gegensatz dazu der einaxiale Elastizitätsmodul:

$$E = 30400 \text{ MPa.}$$

Die Poissonzahl ν wurde zu $\nu = 0,31$ bestimmt.

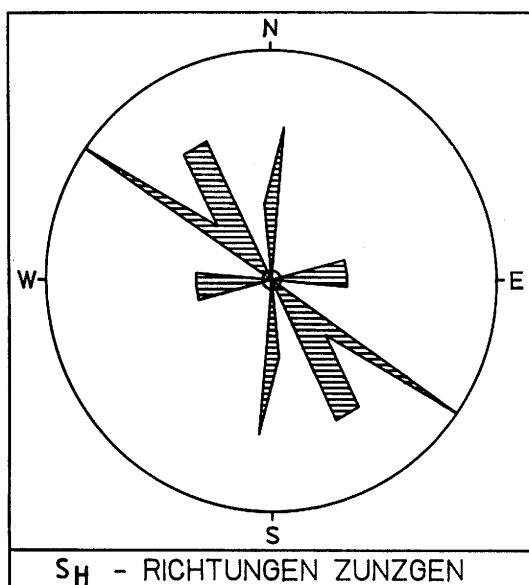


Fig. 2:
Gemessene Richtungen der
größten Hauptspannung im
Steinbruch Zunzgen
(Kreisperipherie $\hat{=}$ 3
Messungen)

2.2.3 Steinbruch Häfelfingen (TK 1:25000, 1088 Hauenstein; 631750/252038)

Der Steinbruch Häfelfingen liegt ungefähr 5,5 km südlich von Gelterkinden. Ebenso wie im Steinbruch Zunzgen wurden auch hier die Messungen im Hauptrogenstein ausgeführt. In 7 Bohrlöchern mit Abständen von ca. 20 m von der Steinbruchwand wurden in Tiefen zwischen 1,89 m und 3,30 m insgesamt 11 technisch einwandfreie Doorstoppermessungen gemacht. Unter diesen Meßwerten waren 2 Ausreißer. Mit den verbliebenen 9 Meßwerten konnte folgendes Ergebnis erzielt werden (Fig. 3):

$$\theta_H = 12^\circ \quad (T = \pm 18^\circ, s = 15, p = 75\%, n = 9)$$

$$\theta_h = 102^\circ$$

$$S_H = 0,01 \text{ MPa}$$

$$S_h = -0,40 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{max.}} = 0,21 \text{ MPa}$$

$$E_G = 10150 \text{ MPa}$$

$$E = 53200 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,27$$

Auffallend an diesem Meßpunkt ist, daß die kleinste Hauptspannung S_h eine Zugspannung ist.

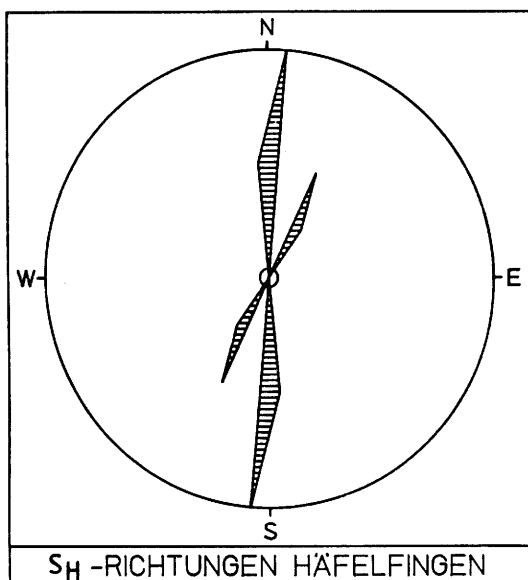


Fig. 3:
Richtungen der größten Hauptspannung im Steinbruch Häfelfingen (Kreisperipherie $\hat{=}$ 4 Messungen)

2.2.4 Steinbruch Hollwanger Hof (TK 1:25000, 8313 Wehr; 3413413/5274350)

Dieser Steinbruch liegt ca. 6,6 km NE von Rheinfeldern entfernt im Dinkelberg. Aufgeschlossen ist in diesem Steinbruch der Hauptmuschelkalk (mo2). In 3 Bohrlöchern, die im Zentrum des Steinbruchs liegen, sind zwischen 1,96 m und 8,00 m 12 Doorstoppermessungen gemacht worden. 2 von diesen Messungen wurden als Ausreißer identifiziert. Die verbleibenden 10 Messungen wurden folgendermaßen ausgewertet (Fig. 4):

$$\theta_H = 61^\circ \quad (T = \pm 38^\circ, s = \pm 31, p = 75\%, n = 10)$$

$$\theta_h = 151^\circ$$

$$S_H = -0,01 \text{ Mpa}$$

$$S_h = -0,29 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{max.}} = 0,14 \text{ MPa}$$

$$E_G = 10300 \text{ MPa}$$

$$E = 56900 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,29$$

Dieser Meßpunkt ist bisher der einzige Meßpunkt in der Umgebung von Basel, dessen kleinste und größte Hauptspannung negativ sind, d.h. S_H und S_h sind Zugspannungen.

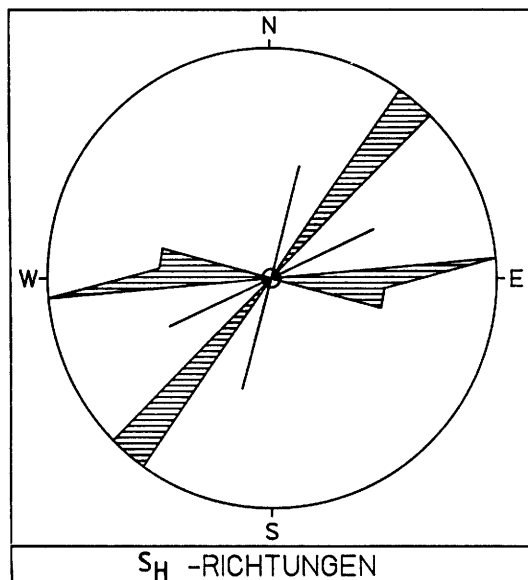


Fig. 4:
Richtungen der größten Hauptspannungen im Steinbruch Hollwanger Hof (Kreisperipherie $\hat{=}$ 2 Messungen).

2.3 Interpretation der in-situ Spannungsmessung

Sowohl die Beträge als auch die Richtungen der Hauptspannungen zeigen bei den in-situ Spannungsmessungen ein recht komplexes Bild (Fig. 5), eine Tatsache, die aufgrund des komplizierten tektonischen Baus der Tafeljura - Dinkelbergscholle infolge ihrer exponierten Lage als Scharnier zwischen dem Schwarzwald, dem Rheingraben und dem Faltenjura auch kaum anders zu erwarten ist. Sicherlich sind die starken Streuungen der Meßergebnisse ein Indiz für die komplizierte tektonische Beanspruchung des Gebirges. Bei

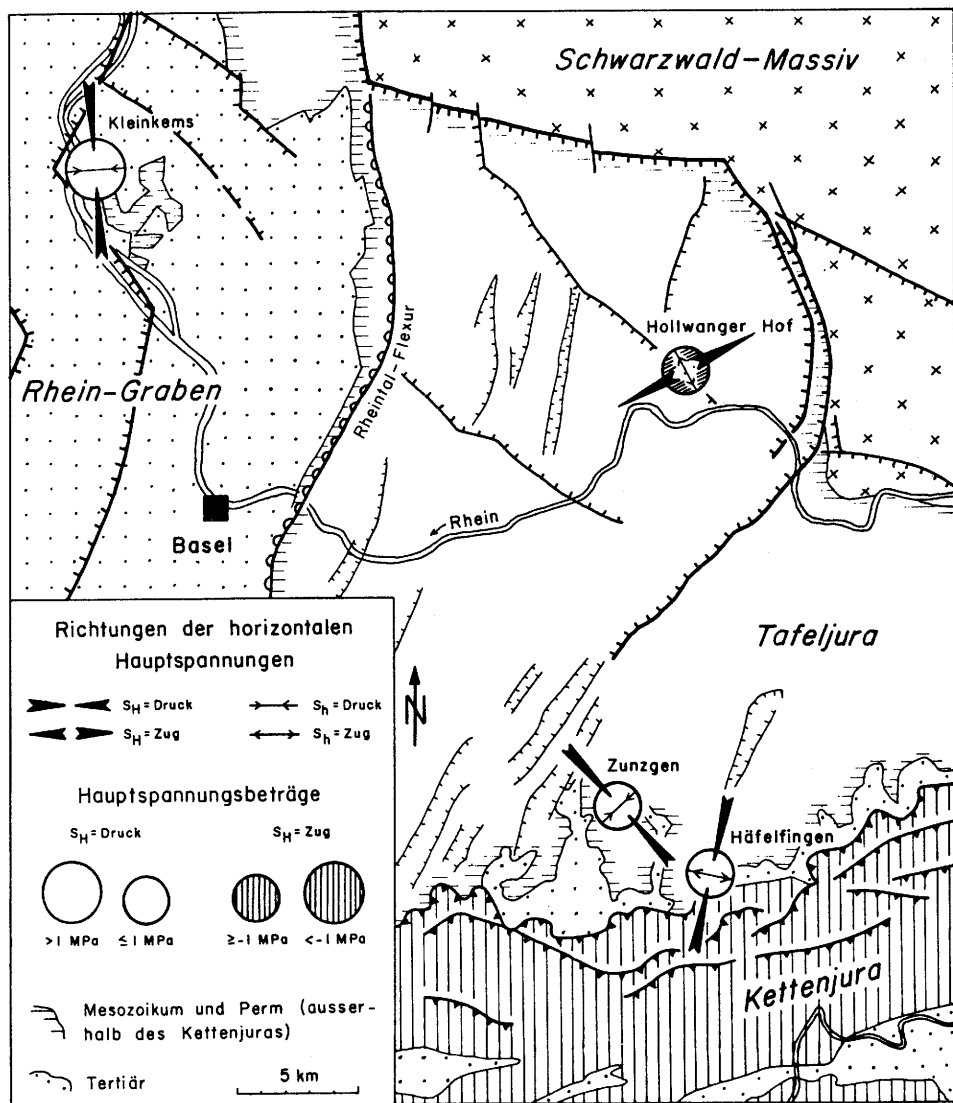


Fig. 5: Lage der Spannungsmesspunkte in der Umgebung Basels.

aller Vielfalt der Richtungen sind im Vergleich mit den Ergebnissen anderer geowissenschaftlicher Untersuchungen bemerkenswerte Übereinstimmungen festzustellen. Die 138° -Richtung für S_H im Steinbruch Zunzgen ist die Richtung, die mit einer Streuung von $+15^\circ$ in weiten Teilen Mitteleuropas aus in-situ Spannungsmessungen ermittelt wurde. Diese Richtung wird in zahlreichen Herdflächenlösungen (AHORNER & SCHNEIDER 1974, BONJER 1984, BONJER et al. 1984, BONJER & APOPEI 1984, PAVONI 1984 u.a.) aber auch durch die Analyse von Bohrlochrandausbrüchen (Kap. 3.4.3) bestätigt. Auch die Ergebnisse des Steinbruchs Häfelfingen ($N12^\circ E$) stehen in sehr guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der aus den Breakouts ermittelten Spannungsrichtungen. Diese S_H -Richtungen, die im Sedimentpaket über dem Abscherungshorizont der Juraüberschiebung festgestellt wurden, zeigen mit $N7^\circ E+10^\circ$ nur eine geringfügige Abweichung von der mit $N12^\circ E+18^\circ$ gemessenen S_H -Richtung im nur ca. 1 km nördlich der Juraüberschiebung gelegenen Steinbruch Häfelfingen.

Der Meßpunkt Hollwanger Hof fällt - sowohl was die Orientierung als auch die Beträge der Hauptspannungen betrifft - völlig aus den bisher aus der Umgebung des Oberrheingrabens bekannt gewordenen Spannungsmessergebnissen heraus. Nur im Kaiserstuhl und in Albersweiler (Pfalz) konnten ähnliche S_H Richtungen bestimmt werden. Zugspannungen im Gebiet des Oberrheingrabens sind bisher nur von dessen nördlichem Ende im Gebiet von Oppenheim (Rheinhessen) bekannt geworden (GREINER 1978; BAUMANN 1982). Interessanterweise wurden im Bereich des südlichen Oberrheingrabens in jüngster Zeit Abschiebungsbeben (Kandern, Wies) beobachtet, deren Herdmechanismen (BONJER 1984; BONJER & APOPEI 1984) im Einklang mit den in-situ Spannungsmessungen am Hollwanger Hof stehen.

Die Beträge der Hauptspannungen in den Steinbrüchen Zunzgen, Häfelfingen und Hollwanger Hof unterscheiden sich nur unwesentlich voneinander. Im deutlichen Gegensatz dazu steht der Meßpunkt Kleinkems, wo der Betrag von S_H fast 8mal größer ist als im Steinbruch Zunzgen.

3. Ergebnisse der Bohrlochrandausbrüche in Bohrungen der NAGRA

3.1 Meßprinzip der Bohrlochrandausbrüche

Die Ausbrüche der Bohrlochwand in Tiefbohrungen können auf zwei verschiedene Arten gemessen werden: zum einen auf mechanischem Weg, zum anderen mit Hilfe von Laufzeitmessungen von hochfrequenten akustischen Signalen.

Die mechanischen Messungen werden mit Hilfe von gerichteten Vierarmkaliber-Meßinstrumenten durchgeführt, die für jede Meßstufe zwei unabhängige, senkrecht zueinander stehende Bohrlochdurchmesser und ihre Ausrichtung gegen magnetisch Nord aufzeichnen (Fig. 6). Da das Meßgerät beim Herausziehen

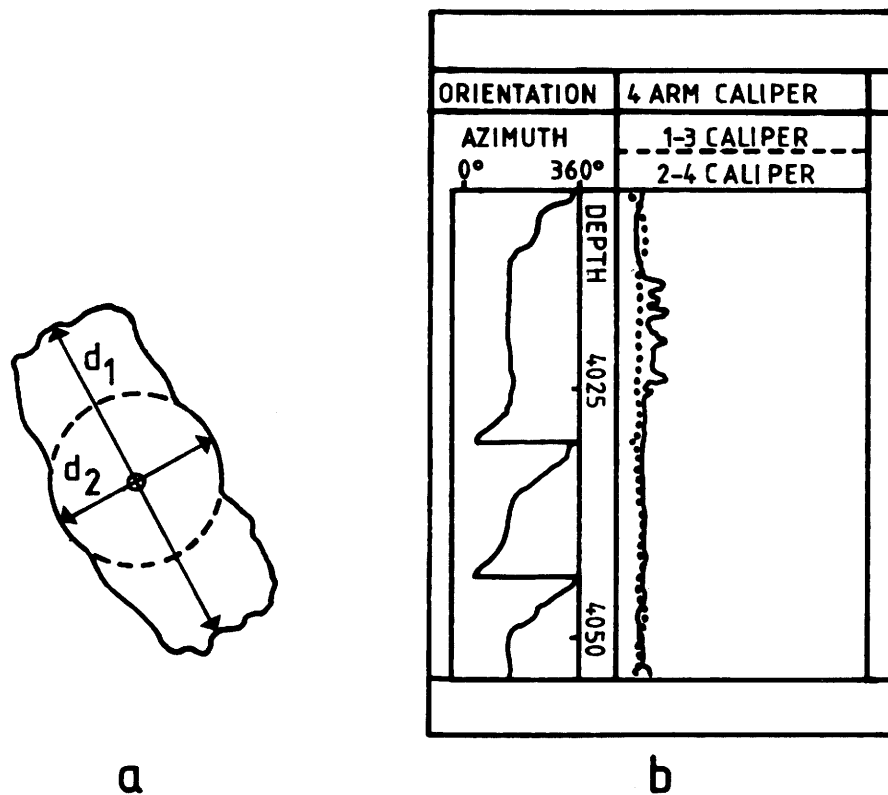


Fig. 6: Prinzip der Vierarmkaliber-Messung. Das Meßgerät, das 4 unabhängige Meßarme besitzt, mißt 2 senkrecht zueinander stehende Durchmesser d_1 und d_2 . Im Falle eines Breakouts (a) wird ein Meßarmpaar im Breakout gefangen und die Rotation des Meßgeräts gestoppt. Das Log (b) zeigt die zugehörige Aufzeichnung der beiden Durchmesser und des Azimuts des Kalibers 1-3. In diesem Beispiel aus einer Bohrung in Norddeutschland wird die Rotation des Meßgerätes durch eine Breakout-Zone in der Tiefe von 4012-4025 m gestoppt.

aus der Bohrung aufgrund des Kabeldralls rotiert, wird über ein gewisses Tiefenintervall ein Bild der Bohrlochform gegeben. Im Bereich von Ausbrüchen wird die Rotation des Meßgeräts mechanisch gestoppt; dies stellt ein erstes Indiz für einen Ausbruch dar. Die Stapelung der Durchmesserdaten (Konturplot) und verschiedene numerische Verbesserungen erlauben dann die exakte Bestimmung der Ausbruchsrichtungen (BLÜMLING et al. 1983).

Die seismoakustische Methode (SABIS) gibt ein weit detaillierteres Bild der Bohrlochwand. Bei diesen Messungen werden von einem rotierenden Sender-Empfänger-System pro Umdrehung 256-600 Messungen mit gleichem Winkelabstand in einem Tiefenintervall von ca. 1 cm durchgeführt und Laufzeiten der seismischen Wellen aufgezeichnet. Diese Messung gibt die Bohrlochwand derart genau wieder, daß sogar das Nachorientieren von Bohrkernen möglich ist. Diese Spezialmessungen konnten nur in einigen Fällen ausgewertet werden, so daß hauptsächlich Vierarmkaliber-Daten zur Untersuchung der Bohrlochrandausbrüche benutzt werden.

3.2 Theorie der Bohrlochrandausbrüche (Breakouts)

Ausbrüche der Bohrlochwand (Breakouts) in Tiefbohrungen sind die Folge von Spannungsumlagerung im Bereich einer Bohrung (BELL & GOUGH 1979), die in tektonisch vorgespanntes Gestein abgeteuft wird. Die neugeschaffene freie Oberfläche bewirkt eine lokale Änderung des Spannungsfeldes in unmittelbarer Umgebung der Bohrung (Fig. 7b). Dieses sekundäre Spannungsfeld

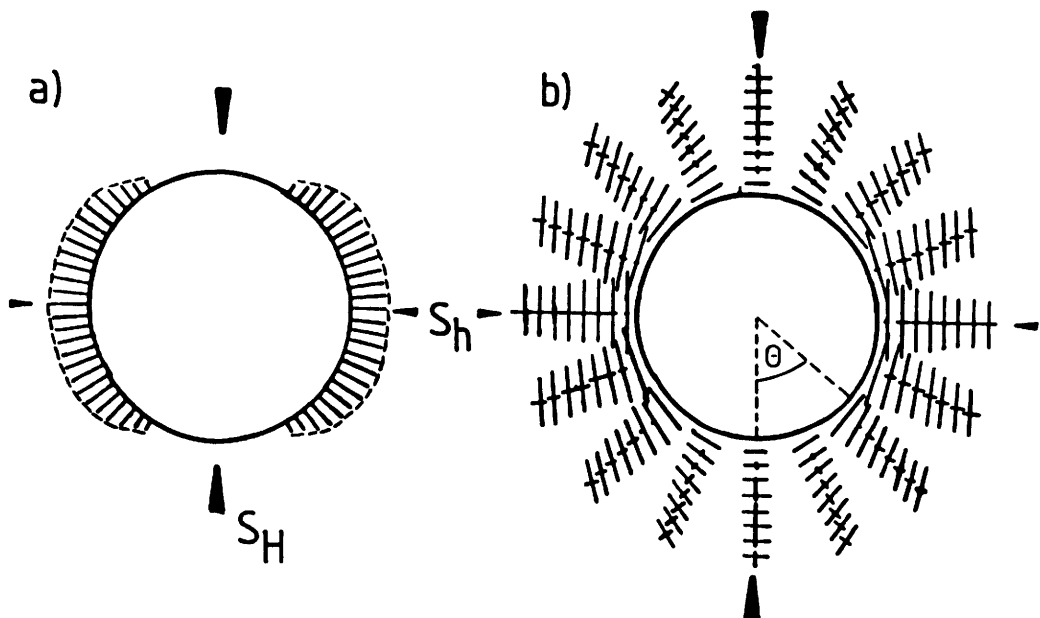


Fig. 7: a) Theoretisch berechneter Ausbruch einer Bohrung in einem anisotropen Spannungsfeld ($S_H > S_h$). b) Spannungsumlagerung am Bohrloch; dargestellt sind Betrag und Richtung der beiden Hauptspannungen. Die maximalen Spannungen treten im Bereich $\theta = 90^\circ$ und 270° auf.

feld wird für den vereinfachenden Fall eines kreisrunden Lochs in einer sonst homogenen unendlich ausgedehnten Platte durch die Kirsch-Gleichungen in Polarkoordinaten (KIRSCH 1898) beschrieben. Bei der Ableitung dieser Gleichungen ist berücksichtigt, daß aus Stetigkeitsgründen keine Normal- (σ_r) und Scherspannungen ($\tau_{r\theta}$) senkrecht zur Bohrlochwand auftreten können. Im Falle eines anisotropen primären Spannungsfeldes, dessen größte horizontale Hauptspannung mit S_H (kleinste horizontale Hauptspannung S_h) bezeichnet wird, zeigt sich eine starke Richtungsabhängigkeit der Normalspannung σ_θ am Rand des Bohrlochs ($r = d$):

$$\sigma_\theta = (S_H + S_h) - 2(S_H - S_h) \cos 2\theta \quad (1)$$

Der in (1) angegebene Winkel θ ist dabei gegen die S_H -Richtung gemessen. Aus Gleichung (1) folgt, daß die Maximalwerte für σ_θ im Falle von Kompressionsspannungen ($S_H > S_h > 0$) unter dem Winkel $\theta = 90^\circ$ und $\theta = 270^\circ$ erwartet werden, während die Minimalspannungen bei $\theta = 0^\circ$ und $\theta = 180^\circ$ auftreten. Im Bereich des Minimums können trotz allseitiger Kompression im primären Spannungszustand negative Spannungen, d.h. Zugspannungen auftreten, falls $S_H > 3S_h$ ist. Das zum Ausbruch (Fig. 7b) führende Materialversagen kann daher durch drei verschiedene Bruchmechanismen beschrieben werden. Zwei dieser Mechanismen werden im Bereich der maximalen Kompressionsspannung wirksam ($\theta = 90^\circ, 270^\circ$), einer im Gebiet der maximalen Zugspannung ($\theta = 0^\circ, 180^\circ$). Zur Veranschaulichung der Bruchmuster beim Versagen unter Kompressionsspannung zeigt Fig. 8 Ergebnisse von triaxialen Bruchversuchen im Labor. Wie von VAN GOLF-RACHT (1982) und GRIGGS & HANDIN (1960) beschrieben, treten bei Bruchversuchen an Gesteinen, abhängig von den jeweiligen Manteldrücken, unterschiedliche Bruchmuster auf. Für die Entstehung von Ausbrüchen sind Fall a und c in Fig. 8 von Bedeutung. Im Falle eines geringen Manteldrucks (a) treten Brüche parallel zu S_h auf, während bei höheren Manteldrücken konjugierte Scherbrüche zu erwarten sind. Die Auswirkung dieser beiden Bruchmechanismen auf ein Gesteinselement E^* im Bereich der Spannungsakkumulation am Bohrlochrand ist in Fig. 9 schematisch dargestellt. Diese Situation wird durch

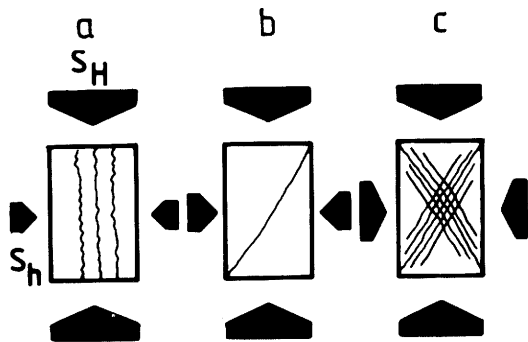


Fig. 8: Bruchverhalten von Gesteinen im Triaxialversuch. Der Manteldruck S_H ist im Fall a am kleinsten und wird in b und c schrittweise erhöht. Abhängig von diesem Manteldruck treten Brüche parallel zu S_h bzw. unter einem Winkel

von $\pm 30^\circ$ auf (GRIGGS & HANDIN 1969).

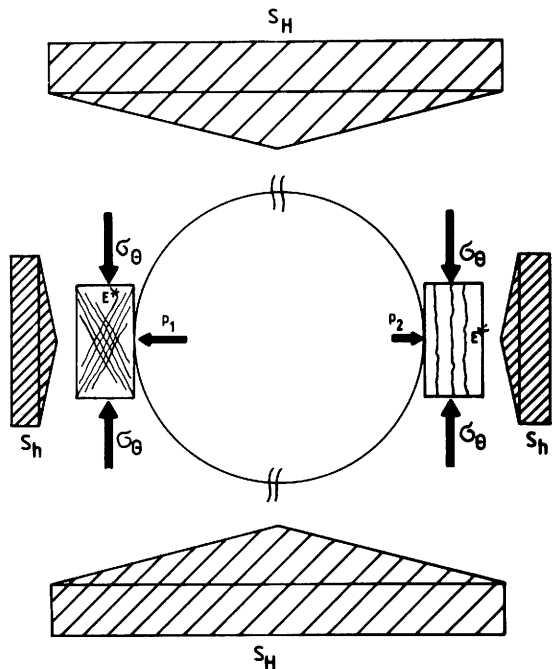


Fig. 9:
Schematische Darstellung des Bruchverhaltens unter Kompression in einem Element E^* (stark vergrößert) im Bereich der maximalen Spannung σ_θ . Bei geringem Manteldruck P_2 treten Brüche parallel zu σ_θ (MASTIN 1984) auf, während in größeren Tiefen bei höherem Manteldruck P_1 (Spülung) konjugierte¹ Scherbrüche (ZOBACK et al. 1984) zu erwarten sind.

die modifizierten Kirsch-Gleichungen unter Berücksichtigung des radial gerichteten Spülungsdrucks beschrieben. Die linke Seite der Skizze stellt den Bruchvorgang dar, wie er in größerer Tiefe bei relativ hohem Spülungsdruck (Manteldruck) zu erwarten ist und wie er von ZOBACK et al. (1984) beschrieben wurde. Das auf der rechten Seite dargestellte Materialversagen wurde von MASTIN (1984) und RUMMEL & MÖHRING-ERDMANN (1984) im Labor in den beanspruchten Bereichen beobachtet. Bei diesen Laborversuchen wurde keine Bohrspülung simuliert, so daß Elemente am Bohrlochrand keinem Manteldruck P ausgesetzt waren.

In den beschriebenen Fällen zeigt das Gestein zwar mikroskopisch unterschiedliche Bruchmuster, makroskopisch zeigen die Ausbrüche jedoch keine Unterschiede in der Ausbruchsrichtung. Eine Unterscheidung, auf welche Art der Bruch ablief, ist daher nur notwendig, falls zusätzlich zur Ausbruchs- und damit der Spannungsorientierung noch eine Abschätzung der Spannungsmagnituden erfolgen soll. Die bisherigen Auswertungen (BLÜMLING & SCHNEIDER 1984, ZOBACK et al. 1984) zeigen jedoch deutlich, daß für eine derartige Abschätzung zur Zeit sowohl die theoretischen Grundlagen als auch die meßtechnische Präzision fehlen.

Der dritte, in der Literatur bisher noch nicht beschriebene Ausbruchsmechanismus ist auf induzierte Zugrisse zurückzuführen. Diese Zugrisse, die, wie oben erwähnt, nur bei starker Spannungsanisotropie zu finden sind, wurden bisher immer als diskrete, mit den üblichen Meßgeräten, wie z.B. Vierarmkaliber, nicht nachweisbare Diskontinuitäten dargestellt. Es hat sich jedoch gezeigt, daß diese Zugrisse durch lokale Störungen am Bohrlochrand ausgeweitet werden können.

Die Zirkulation der Bohrspülung und das mechanische Einwirken des Bohrgestänges beim Bohren können dazu beitragen, daß diese diskreten Zugrisse aufgeweitet werden und meßbare Breakouts bilden. Untersuchungen der Bohrlochwand mit dem akustischen Televiever (SABIS) stützen diese Hypothese. In Fig. 10 sind Ergebnisse von Televievermessungen aus der Bohrung Böttstein dargestellt. Während im Teil a der Abbildung ein Breakout zu erkennen ist, der unter Kompression entstanden ist, zeigt Teil b der Fig. 10 einen Übergang dieses Breakouts in ein Materialversagen, das durch Zugbelastung verursacht worden ist. Es ist zu erkennen, daß sich viele diskrete Zugrisse zu einem scheinbaren Breakout vereinigen. Der Grund für diesen Übergang von dem einen zum anderen Bruchverhalten ist bisher noch unbekannt.

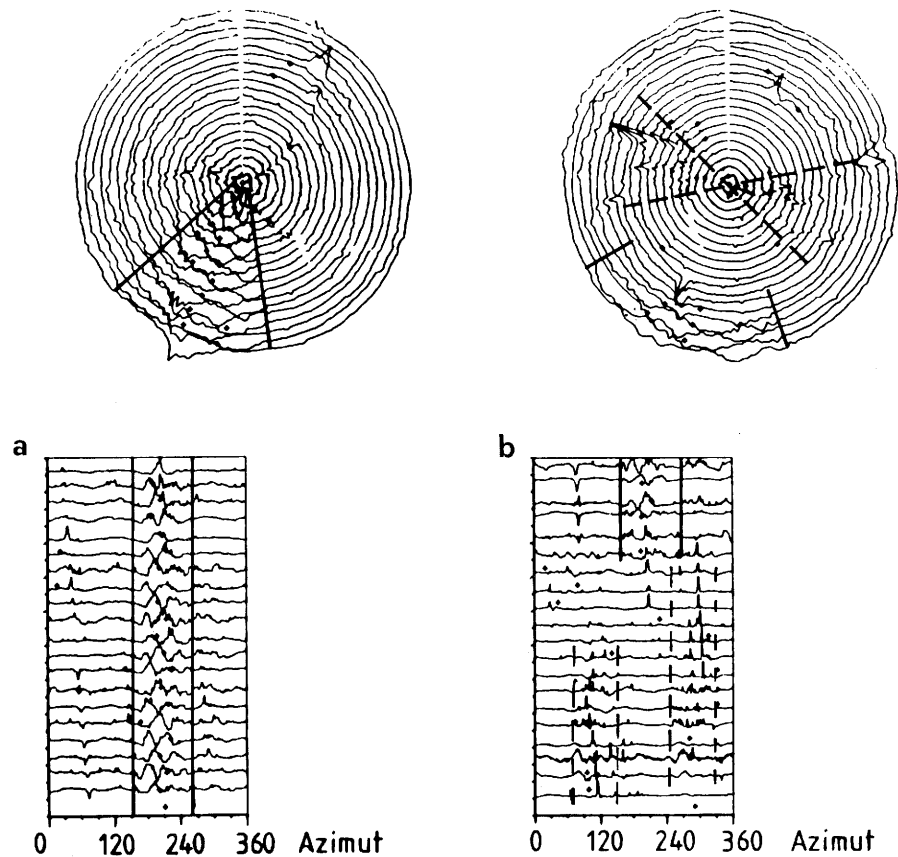


Fig. 10: Darstellung der Laufzeiten von akustischen Wellen (SABIS-Televiever) als Funktion des Azimuts und der Tiefe. Die in a und b mit durchgezogener Linie eingezeichneten Bereiche stellen die Ausbrüche (längere Laufzeit) dar, die unter Kompression entstanden sind. In b ist der Übergang zu Zugrisse deutlich zu erkennen (gestrichelt begrenzter Bereich). Es sind Daten eines 20m Tiefenintervalls dargestellt. Um ein räumliches Bild des Bohrloches zu geben sind die Querschnitte mit der Tiefe verkleinert (oben). Der untere Teil zeigt die gleichen Daten, jedoch sind hier Linien gleicher Laufzeiten als Gerade und nicht als Kreis dargestellt.

3.3 Kaliberdaten der Bohrungen

Die Ausbrüche der Bohrlochwand in den untersuchten Tiefbohrungen wurden mit Hilfe von gerichteten Vierarmkalibern gemessen. Diese Messungen wurden mit unterschiedlichen Geräten, wie z.B. dem SHDT (Stratigraphic High Resolution Dipmeter Tool), dem HDT (High Resolution Dipmeter Tool) und BGT (Borehole Geometry Tool) durchgeführt. Generell ergeben sich dabei die gleichen Meßwerte. Aufgrund des technischen Aufwands ist jedoch die Genauigkeit bei den Azimut- bzw. den Kalibermessungen unterschiedlich. Der maximale gerätebedingte Fehler im Azimut ist in allen Fällen jedoch kleiner als 10° .

Die Daten der einzelnen Bohrungen werden in diesem Bericht nur in Einzelfällen gezeigt. Die Darstellung aller Daten würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Sie werden in Einzelberichten zu den jeweiligen Bohrungen veröffentlicht (z.B. BLÜMLING & SCHNEIDER 1984).

Bei der Analyse der Daten konnten aufgrund der kontinuierlichen Beobachtungen, das Ausbruchverhalten mit der Tiefe detailliert studiert werden. Während aus der Literatur (GOUGH & BELL 1981, BELL & GOUGH 1979) bekannt war, daß in den untersuchten Gebieten die Ausbruchrichtung mit der Tiefe konstant ist, wurde bei diesen Untersuchungen in der Nordschweiz überraschenderweise eine signifikante Drehung der Ausbruchrichtung mit der Tiefe beobachtet. Es wird im folgenden diskutiert werden, daß diese Drehung nicht zufällig sondern systematisch ist.

3.3.1 Bohrung Böttstein

Die Bohrung Böttstein durchteuft 315 m Sedimente und 1186 m kristallines Gestein. Obwohl der Bohrlochdurchmesser in vielen Tiefenintervallen vom Meißeldurchmesser abweicht, konnten keine ausgeprägten spannungsbedingten Ausbrüche gefunden werden. Erst die Differenzdarstellung der gemessenen Kaliber zeigt Vorzugsorientierungen (Fig. 11), die jedoch nicht über die gesamte Bohrung konstant sind. Im Keuper, im Tiefenintervall von 28-117 m, wurden relativ geringe Ausbrüche mit einer Vorzugsorientierung von $N140^\circ E_{+5^\circ}$ beobachtet. Während im Muschelkalk und Buntsandstein keine Breakouts auftraten, sind im Bereich des Kristallins deutliche Vorzugsrichtungen zu erkennen. In den Bereichen 350-580 m sowie 800-1500 m liegt der Ausbruchsazimut bei Werten von $N35^\circ E_{+15^\circ}$, nur in der Tiefe zwischen 600 und 800 m ist eine deutlich andere Richtung von $N110^\circ E_{+20^\circ}$ zu erkennen.

3.3.2 Bohrung Weiach

Die tiefste der fünf untersuchten Bohrungen liegt in einem Permokarbondrog und erreicht erst bei einer Tiefe von 2020 m

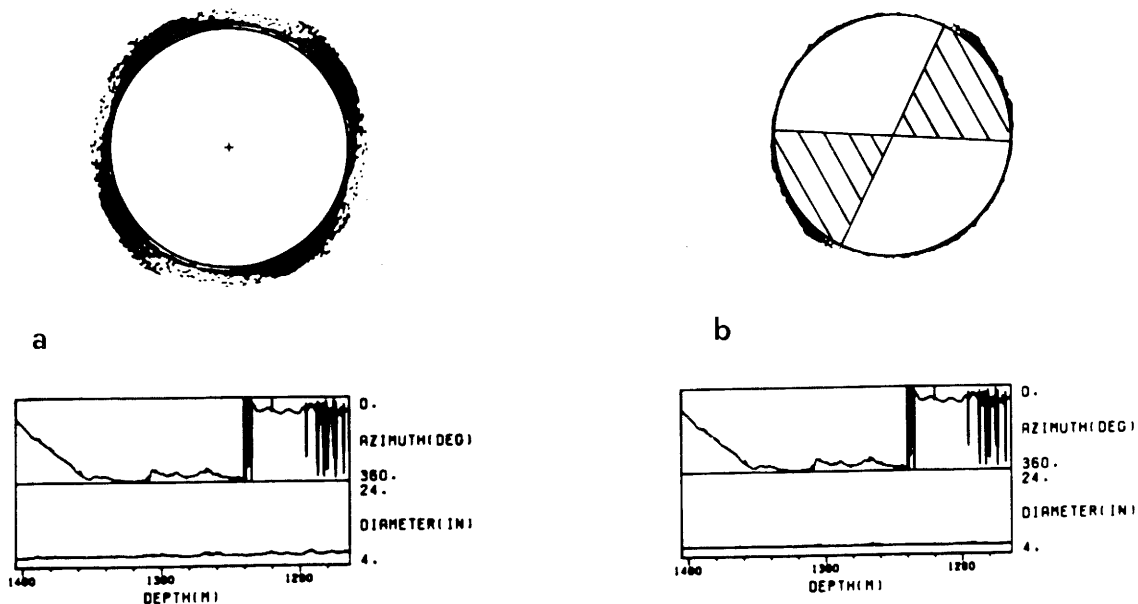


Fig. 11: a) Konturplot aus der Bohrung Böttstein. Ein Konturplot ist die Projektion der gemessenen Kaliberdaten in eine Ebene als Funktion des Azimuts.
 b) Der Kontur-Differenzplot verdeutlicht die Ausbruchsrichtung, da durch Differenzbildung der beiden Kaliber kreisrunde Erweiterungen unterdrückt werden.
 In beiden Fällen sind unter den Konturplots die Originaldaten dargestellt wie sie aus den Logs entnommen wurden.

das Kristallin. Die Endteufe beträgt 2482 m. In den oberflächennahen tertiären Sedimenten (50-210 m) sind die Ausbrüche nach $N140^{\circ}E+5^{\circ}$ gerichtet. Nach einer Zone ohne gerichtete Breakouts (220-430 m) dreht die Ausbruchsrichtung im Malm (430-478 m) und Dogger (478-666 m) deutlich auf $N35^{\circ}E+10^{\circ}$ bzw. $N52^{\circ}E+5^{\circ}$. Wie eindeutig diese Drehung ist, zeigt in Fig. 12 die Serie einanderfolgender Kontur-Differenzplots. Im Lias und Keuper sowie im Muschelkalk bis 940 m treten keine Breakouts auf. Ab 940 m bis 2070 m Tiefe, was stratigraphisch dem tieferen Muschelkalk, dem Buntsandstein, dem Perm und dem Oberkarbon entspricht, zeigen die Ausbrüche der Bohrlochwand Richtungen von $N70^{\circ}E+15^{\circ}$. Auffallend ist die beobachtete Form der Ausbrüche im Perm. Im Gegensatz zu den üblichen relativ flachen Ausbrüchen mit großen Öffnungswinkeln (Fig. 13a) zeigt Fig. 13b die tief ins Gebirge eingeschnittenen schmalen Breakouts des Perms. Nachdem der Permokarbondrog durchteuft ist, werden die Ausbrüche wieder flacher und ähneln den in Böttstein beobachteten Ausbrüchen. Bemerkenswert ist, daß die Ausbruchsrichtung im Gneiss wiederum $N40^{\circ}E+10^{\circ}$ beträgt.

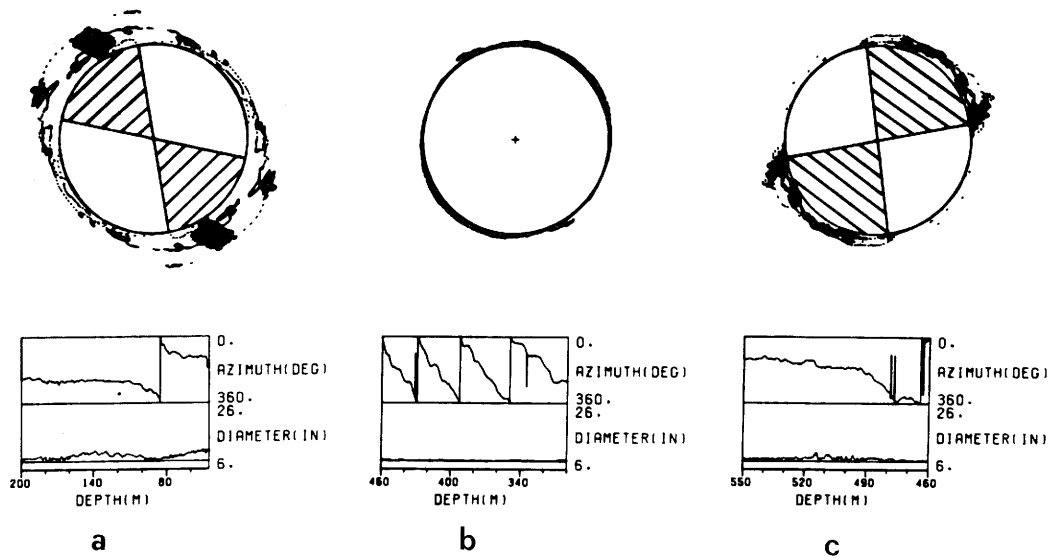


Fig. 12: Das Drehen der Ausbruchrichtung mit der Tiefe ist als Bilderfolge in a-c demonstriert. Deutlich sichtbar ist, daß der Ausbruchszazimut von N 140° E (a) in geringer Tiefe auf N 50° E (c) in größerer Tiefe dreht.

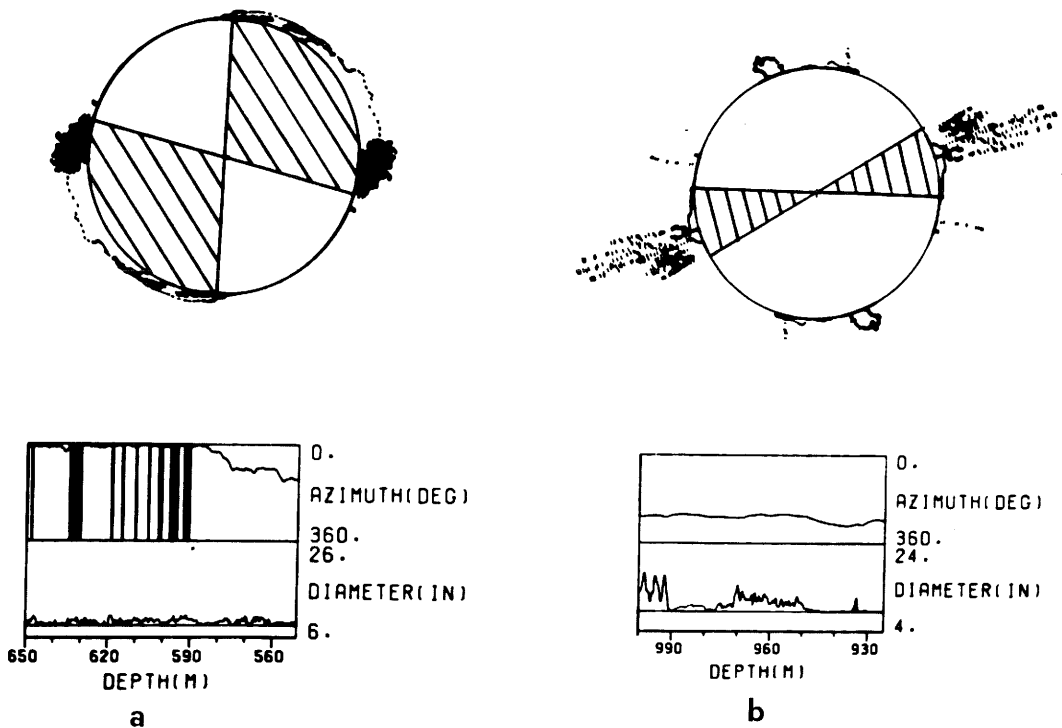


Fig. 13: Die Sedimente im Permokarbondrog (b) zeigen ein deutlich anderes Ausbruchverhalten als andere Gesteine (a). Während normalerweise die Ausbrüche flach und breit sind, schneiden die Ausbrüche im Perm tiefer in das umgebende Gestein ein.

3.3.3 Bohrung Riniken

Die Bohrung Riniken ist für eine tektonische Interpretation nur sehr schlecht geeignet. Aus bohrtechnischen Gründen ist diese Bohrung ab 600 m Tiefe stark ausgekesselt, so daß eine Auswertung der tektonisch bedingten Ausbrüchen unmöglich war. Ignoriert man diese Bedenken und versucht trotzdem eine Interpretation, so zeigt sich, daß in größeren Tiefen jeder Ausbruchsazimut im Bereich von 0° bis 180° möglich ist. Eine eindeutige Vorzugsrichtung in größerer Tiefe ist nicht zu erkennen.

Im oberflächennahen Teil der Bohrung bei Tiefen kleiner als 620 m sind einige verlässliche Werte zu finden. Während in Tiefen kleiner als 280 m im Malm und in Bereichen des Doggers eine Ausbruchsrichtung von $N150^\circ E+15^\circ$ beobachtet wird, dreht die Ausbruchsrichtung in dem folgenden Tiefenintervall, ähnlich wie bei den anderen Bohrungen, um nahezu 90° auf $N70^\circ E+10^\circ$.

3.3.4 Bohrung Schafisheim

Aus der Bohrung Schafisheim, der einzigen Bohrung, die durch die Juraüberschiebung gebohrt wurde, sind keine Daten aus Tiefen kleiner als 300 m vorhanden, so daß keine Aussage über das Ausbruchsverhalten der quartären Sedimente gemacht werden kann. Erst aus dem Tertiär sind Daten vorhanden (300-570 m). In diesem Tiefenbereich sind sehr schwache Ausbrüche zu erkennen ($N57^\circ E+20^\circ$). Im weiteren Verlauf der Bohrung dreht die Ausbruchsrichtung im Malm und im oberen Teil des Doggers auf $N97^\circ E+10^\circ$. Unmittelbar unterhalb des Juras, im Keuper, sind nahezu keine oder aber nur sehr schwache Ausbrüche in $N60^\circ E+20^\circ$ -Richtung vorhanden. Im darunterliegenden Muschelkalk (1230-1478 m) beobachtet man hingegen Richtungen von $N45^\circ E+10^\circ$. Das kristalline Grundgebirge erreicht die Bohrung Schafisheim in 1490 m Tiefe. Hier führt allerdings eine Auswertung mit Hilfe der Kontur- bzw. Konturdifferenzplots zu keinem Ergebnis. Erst eine andere, bei der Bohrung Kaisten näher beschriebene Methode läßt auf einen Ausbruchsazimut von $N40^\circ E$ schließen. Der Fehler muß in diesem Fall jedoch mit mindestens $\pm 20^\circ$ angegeben werden.

3.3.5 Bohrung Kaisten

Die zweite Bohrung, die schon in geringer Tiefe (297 m) auf kristallines Grundgebirge stieß, ist die Bohrung Kaisten. Sie durchteuft zuerst 45 m quartäre Sedimente, 49 m Muschelkalk und 31 m Buntsandstein. Sowohl in diesen Schichten, als auch im darunterliegenden Perm (125-297 m) sind die Ausbrüche $N160^\circ E+10^\circ$ gerichtet. Im Gneiss waren kaum Ausbrüche erkennbar, nur in den Tiefen 440-475 m und 900-940 m wurden sehr schwache Erweiterungen beobachtet. Auffallend sind diese schon im Kristallin der Bohrung

Böttstein beobachteten geringen Ausbruchsamplituden. Obwohl auch in den auswertbaren Tiefenbereichen die Ausbruchrichtung $N35^{\circ}E+10^{\circ}$ betrug, kam die Frage auf, ob eine Beobachtung in sehr kleinen Teilbereichen ausreichend ist, um eine Aussage über die gesamte kristalline Bohrstrecke der Bohrung Kaisten zu machen. Bei der Suche nach weiteren Indizien für eine Analyse der Spannungsrichtungen fiel auf, daß die gleichmäßige Rotation des Meßgeräts in verschiedenen Tiefenbereichen gestoppt wurde, obwohl die beiden Kaliber scheinbar gleiche Werte zeigten (Fig. 14). Im Hinblick auf die oben erwähnten geringen Ausbruchsamplituden im Gneiss wurde von der Arbeitshypothese ausgegangen, daß in einigen Tiefen-

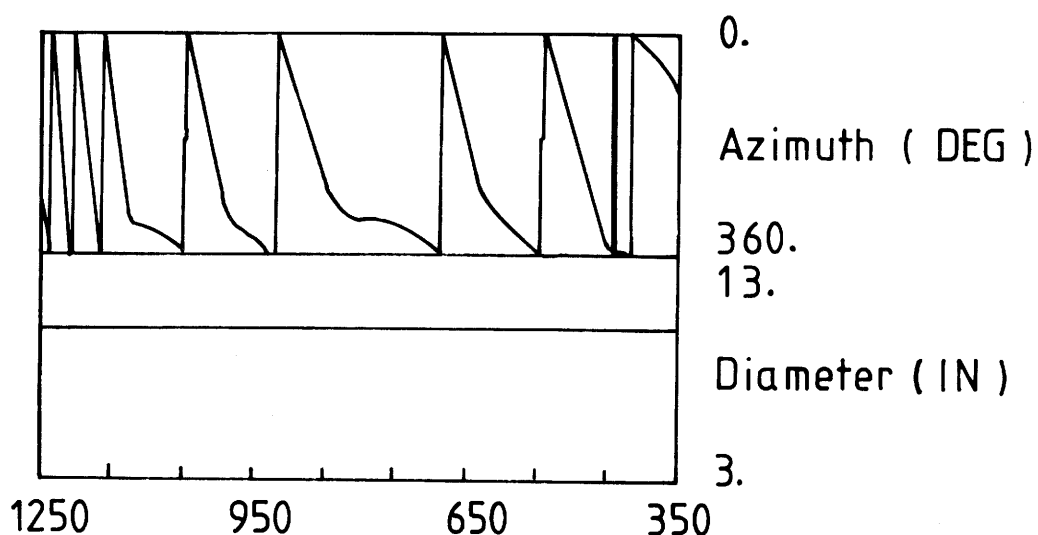
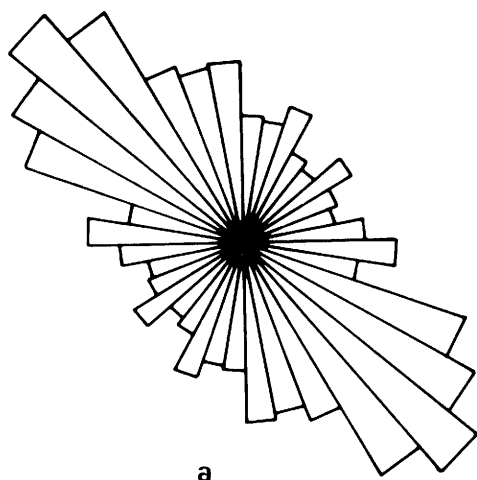


Fig. 14: Im Kristallin der Bohrung Kaisten sind nur sehr wenige Erweiterungen der Bohrung festzustellen. Trotzdem zeigt der Azimut, daß die Rotation des Meßgeräts an mehreren Stellen gestoppt wurde. (Die gemessenen Kaliber sind hier nicht dargestellt, da sie nahezu konstant waren.)

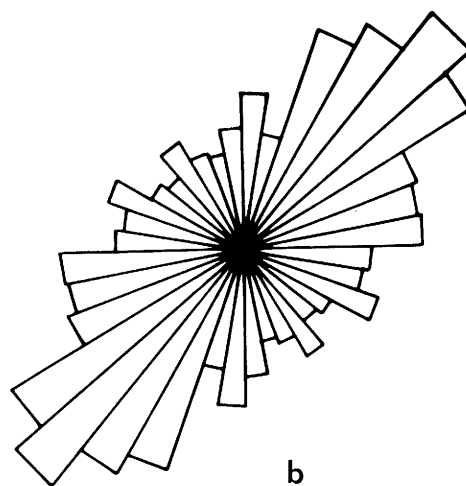
bereichen zwar Ausbrüche existieren, deren Amplituden jedoch nicht aufgelöst werden. Um diese, von der technischen Beschaffenheit des Meßgeräts gegebene Schwierigkeit zu umgehen, wurde eine statistische Analyse der gemessenen Azimutwerte vorgenommen. Da ein nahezu kontinuierliches Drehen und zufällig auftretende Störungen zu einer Gleichverteilung führen müßte, würde eine bevorzugte Häufung von gleichen Azimutwerten auf eine Vorzugsausbruchrichtung hinweisen. Da man bei dieser Betrachtung keine Kontrolle hat, welches der beiden Kaliberpaare den Rotationsstop des Meßgeräts bewirkt hat, kommen mehrere senkrecht zueinander stehende Lösungen in Frage. Fig. 15a zeigt das Ergebnis unter der Annahme, daß immer das Kaliberpaar 1-3 die Rotation des Meßgeräts gestoppt hat, während in Fig. 15b von der anderen extremen These, Kaliber 2-4 sei für das Abbrechen der Drehung verantwortlich, ausgegangen wird. In den beiden dargestellten Häufigkeitsverteilungen der Azimute

KAISTEN Kaliber 1



a

KAISTEN Kaliber 2



b

Fig. 15: Die statistische Auwertung der gemessenen Azimute aus dem Kristallin der Bohrung Kaisten zeigt eine eindeutige Vorzugsorientierung.

a) Es wurde angenommen, daß Kaliber 1-3 die Geräterotation gestoppt hat.

b) Es wurde angenommen, daß Kaliber 2-4 für den Rotationsstop verantwortlich war.

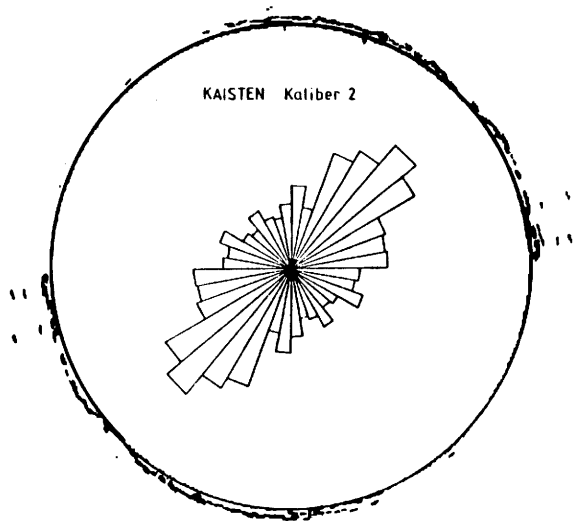


Fig. 16:
Vergleich eines Konturplots aus der Bohrung Kaisten (900-940m) mit der statistischen Verteilung der Azimute aus Fig. 15b.

im gesamten Kristallin der Bohrung Kaisten zeigt sich ein deutliches Maximum. Nimmt man nun eine der wenigen zur Verfügung stehenden Konturplots dieser Bohrung (900-940 m; 440-475 m) als Markerpositionen, so erkennt man (Fig. 16), daß die in Fig. 15b gemachte Annahme mit hoher Wahrschein-

lichkeit richtig ist. Der Ausbruchsazimut wird daher als relativ konstant im gesamten Kristallin mit $N45^{\circ}E_{+10^{\circ}}$ angenommen.

3.4 Interpretation der Bohrlochrandausbrüche

Die fünf in der Nordschweiz untersuchten Bohrungen zeigen weder lateral noch in der Tiefe konstante Ausbruchsrichtungen. Betrachtet man alle Ergebnisse auf einen Blick (Fig. 17), so kommt man angesichts der starken Streuung zum Schluß, daß die Azimute über einen breiten Bereich variieren und keine generelle tektonische Aussage gemacht werden kann. Da die Bohrungen jedoch in einem geologisch komplexen und tektonisch stark beanspruchten Gebiet niedergebracht wurden, sind Änderungen im lokalen Spannungsfeld vorstellbar. Die Resultate müssen daher sehr detailliert analysiert werden.

3.4.1 Abhängigkeit des Ausbruchsazimuts von der Stratigraphie

Da die 5 beschriebenen Bohrungen sehr verschiedene Gesteine durchteuft haben, ist die Frage zu erörtern, ob eine Abhängigkeit zwischen den Ausbruchsrichtungen und der Stratigraphie besteht. Fig. 18 zeigt jedoch, daß diese Annahme nicht richtig ist. Zwar verdeutlicht die Graphik, daß z.B. im Tertiär, Lias und auch im Kristallin nahezu konstante Ausbruchsrichtungen beobachtet wurden, doch wird die Hypothese in anderen Bereichen widerlegt. Im Malm und Muschelkalk schwanken die Orientierungen um $+90^{\circ}$ und auch im Keuper und Perm sind die beobachteten Breakouts bei weitem nicht konstant.

3.4.2 Tiefenabhängigkeit des Ausbruchsazimuts

Eine bessere Erklärung der Richtungsänderung ist eine Tiefenabhängigkeit der Breakouts. In Fig. 17 ist deutlich zu erkennen, daß in oberflächennahen Schichten, ganz gleich, ob es sich um tertiäre Sedimente, um Malm oder Muschelkalk handelt, eine andere Ausbruchsrichtung beobachtet wird als in größerer Tiefe. Im Mittel liegt der Unterschied zwischen der oberflächennahen und der tiefen Richtung bei 60° - 90° . Die Tiefe, bei der die Drehung der Breakouts beobachtet wird, liegt bei ca. 300 m. Nur im Falle der Bohrung Schafisheim findet die Drehung bei 570 m statt. Diese Ergebnisse der Bohrung Schafisheim dürfen jedoch für diese Betrachtung nicht zu stark bewertet werden, da im oberen Teil der Bohrung nur wenig Daten zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund wurde in Fig. 19a kein Ausbruchsazimut für die Bohrung Schafisheim dargestellt. In Fig. 19 werden die gemittelten Werte aus den beiden Tiefenintervallen gegenübergestellt (a = Tiefe < 300 m; b = Tiefe > 300 m).

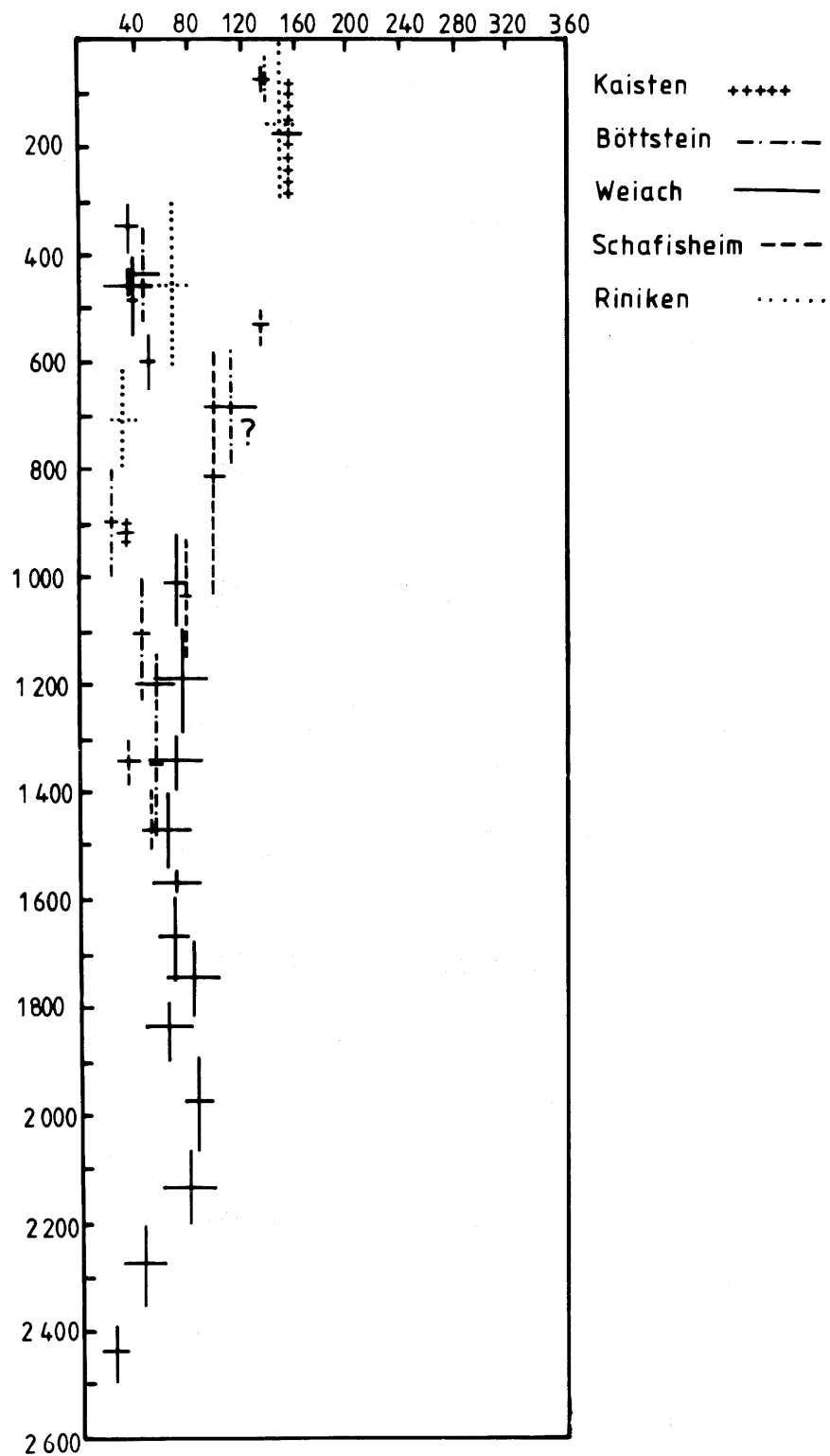


Fig. 17: Gemessene Ausbruchrichtung als Funktion der Tiefe in 5 Bohrungen in der Nordschweiz. Deutlich zu erkennen ist die geänderte Ausbruchrichtung in den oberen 300m.

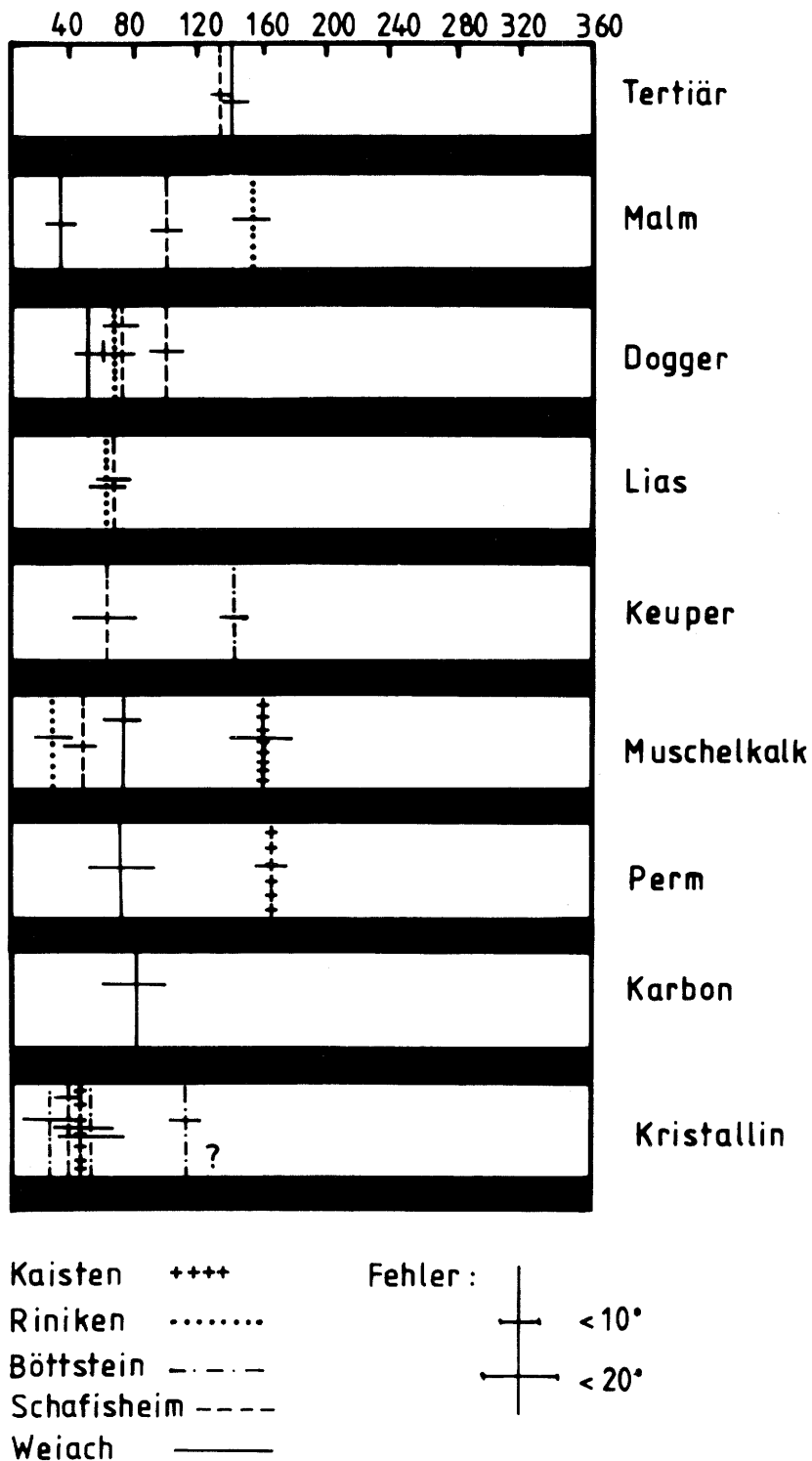


Fig. 18: Ausbruchrichtungen als Funktion der Stratigraphie in Bohrungen der Nordschweiz. Es ist kein Zusammenhang zwischen Ausbruchrichtung und Stratigraphie zu erkennen.

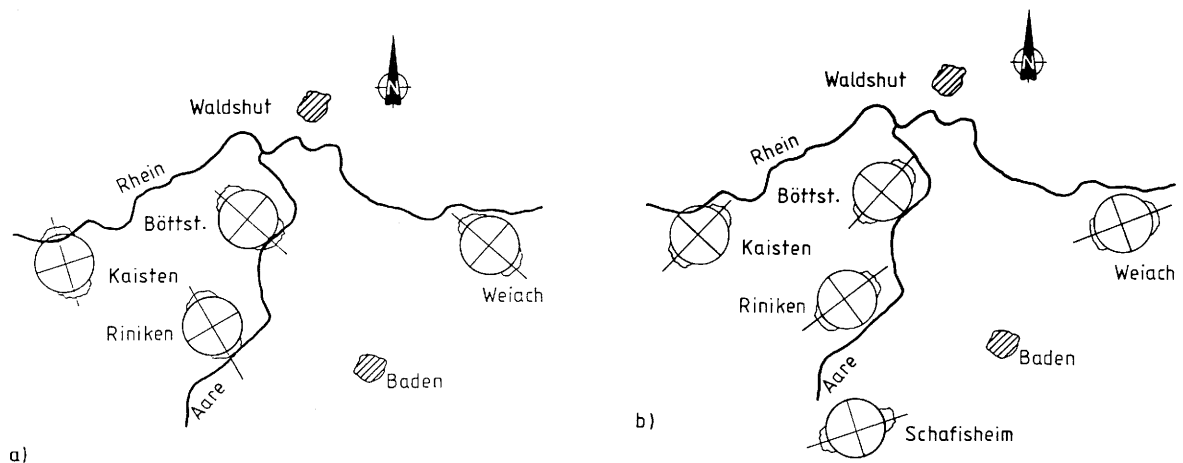


Fig. 19: a) Mittlere Ausbruchsrichtung in Tiefen kleiner als 300m.
 b) Mittlere Ausbruchsrichtungen in Tiefen größer als 300m.

Eine Erklärung dieses Oberflächenphänomens kann nicht ohne weiteres gegeben werden. Es bieten sich zwei Hypothesen an. Die erste Hypothese geht davon aus, daß sich an der Oberfläche bevorzugt Zugrisse ausbilden, die sich wie oben beschrieben zu einem Breakout vereinen, der theoretisch in S_H -Richtung verläuft. Diese Zugrisse können am leichtesten an der Oberfläche erzeugt werden, da die Bedingung $S_H/S_h > 3$ dort zuerst erfüllt wird. Geht man davon aus, daß die Horizontalspannung sich aus lithostatischer und tektonischer Spannung zusammensetzt, so ergibt sich an der Erdoberfläche für die horizontale Hauptspannung in Richtung der tektonischen Spannung: $S_H = S_{\text{tektonisch}}$. Die kleinste horizontale Hauptspannung S_h dagegen ist hier gleich null. Das Verhältnis S_H/S_h ist damit an der Erdoberfläche unendlich. Nehmen beide Hauptspannungen nun nahezu linear mit der Tiefe zu, wie es in Hydraulic-Fracturing-Versuchen für diese Tiefenbereiche gezeigt wurde (RUMMEL et al. 1982), so erreicht das Verhältnis S_H/S_h ab einer bestimmten, von den örtlichen Gegebenheiten abhängigen Tiefe, Werte kleiner als 3. Ab dieser Tiefe dürfen theoretisch keine Zugrisse mehr auftreten.

Die zweite Möglichkeit zur Erklärung der Drehung der Ausbruchsrichtung an der Oberfläche ist, daß das Spannungsfeld dreht, oder daß oberflächennah Zugspannungen auftreten. Dies könnte aus topographischen als auch aus seismotektonischen Gründen (HEALY 1984, pers. Mitteilung) möglich sein. Obwohl topographische Effekte ausgeschlossen werden können, und die Entstehung von Zugrisse in der Nähe einer Bohrung im Labor bei geringen Manteldrücken eindrucksvoll gezeigt wurde (Fig. 20), kann noch keine eindeutige Erklärung des Phänomens erfolgen. Die beobachteten Ausbrüche sehen im Konturplot (Fig. 12a) einerseits aus, als wären sie unter Kompression entstanden, andererseits ist eine Quelle für diese Spannungsumkehr zur Zeit nicht bekannt.

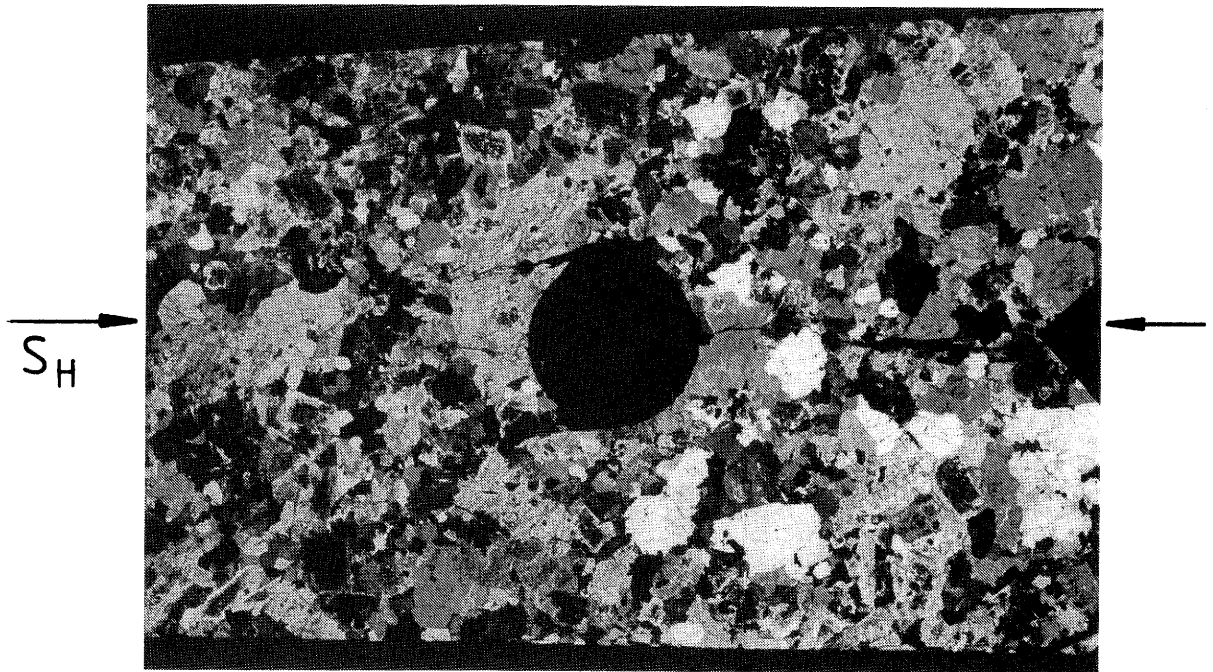


Fig. 20: Die Dünnschliffaufnahme verdeutlicht das Ausbruchsverhalten von Gesteinen in Bohrungen bei einem Verhältnis von $S_H/S_h > 3$. Sehr deutlich sind die Zugrisse in S_H -Richtung zu erkennen, die bei Laborversuchen an Proben des Granits der Bohrung Böttstein auftraten. Der Granit wurde bei einem Manteldruck von 10 MPa deformiert.

In größerer Tiefe hat man keine Schwierigkeiten mehr, bei relativ konstanten Ausbruchsrichtungen die regionale Hauptspannungsrichtung zu bestimmen. Sie beträgt im Mittel für die Bohrungen Riniken, Weiach und Schafisheim $N160^\circ E \pm 10^\circ$ und für Böttstein und Kaisten $N135^\circ E \pm 10^\circ$. Diese Bohrungen zeigen generelle Übereinstimmung mit Hauptspannungsrichtungen, die aus Herdflächenlösungen (AHORNER 1970, BONJER et al. 1984, BONJER 1984, PAVONI 1984) abgeleitet wurden (Fig. 21).

3.4.3 Räumliche Verteilung der Ausbrüche

Die gemessenen Ausbrüche der Bohrlochwand hängen nicht allein von der Tiefenlage ab. Vielmehr ist auch die räumliche Lage der Bohrung von Wichtigkeit. Die stratigraphischen Untersuchungen in den Bohrungen und die reflexionsseismischen Messungen zeigen einen mächtigen Permokarbondrog im Untersuchungsgebiet. Er liegt unter dem Falten- und Tafeljura und weist eine Breite von 8-10 km auf. Im Zentrum erreicht er eine Tiefe von mehr als 2000 m.

Sein allgemeines Streichen folgt dem des Faltenjuras. Diese Struktur hat einen lokalen Einfluß auf das Spannungsfeld und bewirkt signifikante Änderungen der Ausbruchsrichtung. Fig.

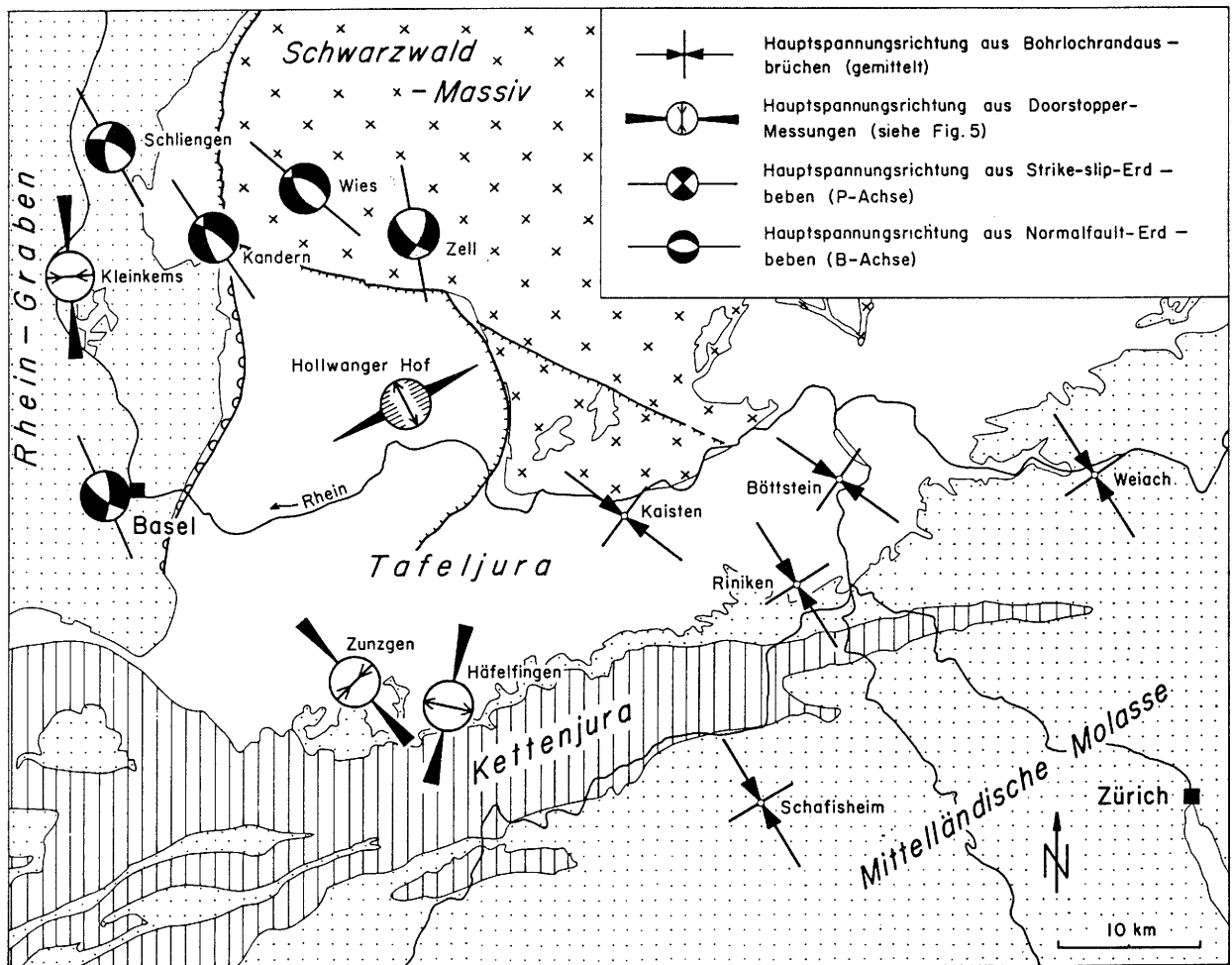


Fig. 21: Vergleich der aus den Ausbrüchen bestimmten Hauptspannungsrichtungen mit in-situ Spannungsmessungen und Herdflächenlösungen von Erdbeben (BONJER 1984).

22 zeigt deutlich, daß im kristallinen Grundgebirge und auch in den Sedimenten unterhalb der Juraüberschiebung eine Hauptspannungsrichtung von $N135^{\circ}E \pm 10^{\circ}$ gemessen wird. Dieser Wert stimmt sehr gut mit Spannungsbestimmungen aus Herdflächenlösungen überein. AHORNER (1970) gibt als mittlere Richtung im Rheingraben $N142^{\circ}E$ an und BONJER (1984) zeigte, daß bei Beben in Kander, Wies und Schliengen Werte von $N137^{\circ}E \pm 5^{\circ}$ auftreten. Weitere Herdflächenlösungen in Südwestdeutschland (BONJER et al. 1984), im Mittelland und in der Nordschweiz (PAVONI 1984) zeigen, daß die P-Achse in NNW-SSE-Richtung verläuft. Diese Untersuchungen stützen sich weitgehend auf Daten von Horizontalverschiebungen (strike-slip-Beben) bei der P-Achse mit der Hauptspannungsrichtung gleichgesetzt wird. Dabei ist zu beachten, daß man von der These ausgeht, der Scherwinkel betrage 45° zur Hauptspannungsrichtung. Labormessungen haben jedoch immer wieder gezeigt, daß der Scherwinkel nicht größer als 30° ist, so daß

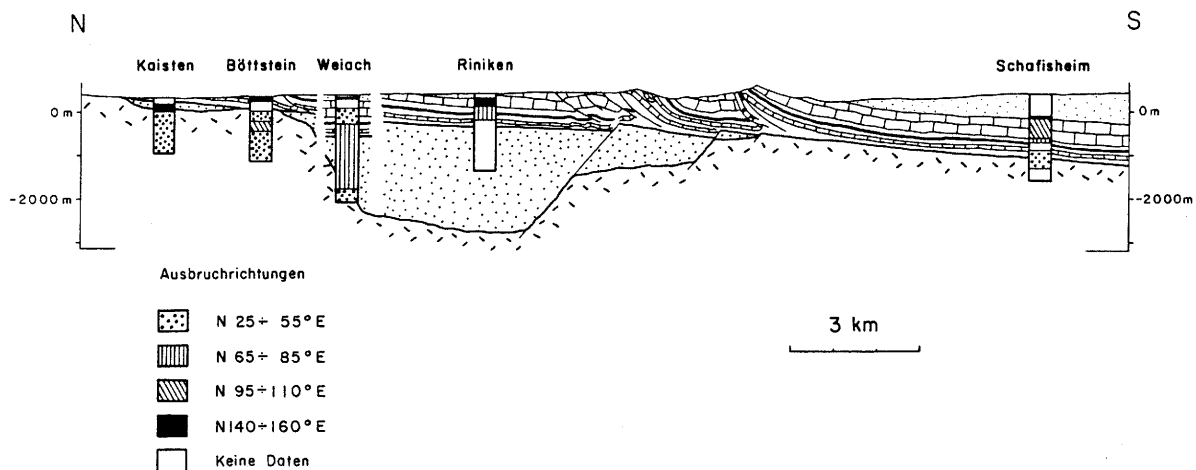


Fig. 22: Schematische Darstellung der Ausbruchsrichtungen in der Nordschweiz. Zu erkennen ist die konstante Ausbruchsrichtung im kristallinen Grundgebirge von $N45^{\circ}E$. Sowohl im Permokarbondrog als auch oberhalb der Juraüberschiebung treten deutliche Änderungen der Ausbruchsrichtung auf.

bei strike-slip-Beben eine Aussage über die Hauptspannungsrichtung nur sehr schwer möglich ist und wahrscheinlich einen generellen Fehler von $10-15^{\circ}$ aufweist.

Neben dieser gut belegten Spannungsrichtung im Grundgebirge, werden im Permokarbondrog hauptsächlich Spannungsrichtungen von $N160^{\circ}E \pm 10^{\circ}$ und im Sedimentpaket oberhalb des Abscherungshorizonts der Juraüberschiebung Richtungen von $N7^{\circ}E \pm 10^{\circ}$ gemessen (Fig. 22). Die Änderung des Spannungsfeldes im Permokarbondrog kann durch unterschiedliches Materialverhalten (soft inclusion) erklärt werden. SCHNEIDER (1985) zeigt mit Hilfe von Finite-Element-Rechnungen, daß Spannungsumlagerungen und Drehungen des Spannungsfeldes in der beobachteten Größenordnung von circa 20° durchaus möglich sind.

Bemerkenswert sind ferner die Unterschiede des Spannungsfeldes im kristallinen Grundgebirge und in den darüberliegenden, nach Norden transportierten Sedimenten. Es zeigt sich, daß das Grundgebirge tektonisch anders beansprucht wird als das über den duktilen Anhydrit gleitende Sedimentpaket. Dieses duktile Verhalten des Anhydrits führt wahrscheinlich zur mechanischen Entkopplung des Grundgebirges von den darüberliegenden mesozoischen und tertiären Sedimenten, so daß die tektonische Beanspruchung des Sedimentpakets ausschließlich auf den direkten Schub aus den Alpen zurückzuführen ist (MÜLLER & BRIEGEL 1980). Dies würde die gemessene Richtung ($N7^{\circ}E$) des Spannungsfeldes erklären.

Eine genaue Klärung der Spannungsumlagerung im Permokarbondrog und im Bereich der Juraüberschiebung wird von einer detaillierten dreidimensionalen Finite-Element-Rechnung erwartet.

4. Schlußfolgerungen

Die Breakout-Daten und die in-situ Spannungsmessungen nach der Doorstopper-Methode geben ein detailliertes Bild des regionalen Spannungsfeldes und seiner lokalen Änderungen in der zentralen Nordschweiz. Die wichtigsten Feststellungen sind:

1. Im Grundgebirge und in einigen Teilen des mesozoischen Deckgebirges werden Hauptspannungsrichtungen von $N135^{\circ}E_{\pm 10^{\circ}}$ gemessen. Diese Richtung stimmt mit der aus der Literatur bekannten Richtung des mitteleuropäischen Spannungsfeldes (AHORNER et al. 1983) überein.
2. In den Sedimenten des Permokarbons dreht die Spannungsrichtung auf $N160^{\circ}E_{\pm 10^{\circ}}$.
3. Oberhalb des Abscherungshorizonts der Juraüberschiebung sowie in ihrem näheren Einflußbereich beträgt die Richtung der horizontalen Hauptspannung $N10^{\circ}E_{\pm 10^{\circ}}$.
4. Die oberflächennahen Ausbruchsrichtungen (Tiefe < 300 m) können durch einen veränderten Ausbruchsmechanismus (Zugrisse) erklärt werden. In diesem Fall bestätigen diese Ausbrüche die in größerer Tiefe gemessenen Spannungsrichtungen.
5. Die in der Dinkelbergscholle gemessenen horizontalen Zugspannungen bestätigen die von BONJER (1984) und BONJER & APOPEI (1984) bestimmten Herdmechanismen der Abschiebungsbeben im Bereich Wies und Kandern.

Diese Ergebnisse zeigen, daß in tektonisch heterogenen Gebieten die Spannungen starken lateralen und vertikalen Änderungen unterworfen sind. Nur ein enges Meßpunktraster und die Zusammenfassung der Ergebnisse verschiedener Meßmethoden ermöglicht eine detaillierte Aussage über die dreidimensionale Struktur des Spannungsfeldes. Für die lokalen Variationen müssen Heterogenitäten wie soft inclusion Effekte und Entkopplungszonen an Überschiebungshorizonten verantwortlich gemacht werden.

5. Literaturverzeichnis

A. Publikationen

- Ahorner, L. (1970): Seismo-tectonic relations between the Graben zones of the Upper and Lower Rhine valley. In: Graben Problems, Illies, H., Müller, St. eds: pp. 156-166, Schweizerbart Stuttgart.
- Ahorner, L. and G. Schneider, (1974): Herdmechanismen von Erdbeben im Oberrheingraben, In: Approaches to Taphrogenesis, Illies, H., Fuchs, K. eds: pp. 99-104, Schweizerbart Stuttgart.
- Ahorner, L., Baier, B., and K.-P. Bonjer, (1983): General pattern of seismotectonic dislocations and the earthquake generating stress field in Central Europe between the Alps and the North Sea. In: Plateau Uplift - The Rhenish Massif, A Case History, Fuchs, K., v. Gehlen, K., Mälzer, H., Murawski, H. and Semmel, A. eds: pp. 187-197, Springer Verlag.
- Baumann, H. (1982): Spannung und Spannungsumwandlung im Rheinischen Schiefergebirge. 232S., 1. Aufl., Koblenz (Numismat. Verlag G.M. Forneck).
- Bell, J.S. and D.I. Gough, (1979): Northeast-southwest compressive stress in Alberta: evidence from oil wells, Earth Planet. Sci. Letters, 45, 475-482.
- Blümling, P., Fuchs, K., and T. Schneider, (1983): Orientation of the stress field from breakouts in a crystalline well in a seismic active area, Phys. Earth Planet. Int. 33, pp. 250-254.
- Bonjer, K.-P. (1984): The seismicity of the Rhinegraben system - source parameters, propagation- and site effects, In: Seismic Activity in Western Europe, P. Melchior ed.: in press.
- Bonjer, K.-P., Gelbke, C., Gilg, B., Rouland, D., Mayer-Rosa, D., and Massinon, B. (1984): Seismicity and dynamics of the Upper Rhinegraben. J. Geophys., in press.
- Bonjer, K.-P., and I. Apopei, (1984); Seismic dislocation pattern in the Southern Rhinegraben/Black Forest area, in preparation.
- Cahnbley, H. (1970): Grundlagenuntersuchungen über das Entspannungsbohrverfahren während des praktischen Einsatzes in großer Teufe. Dissertation, TU Clausthal, 166S., Clausthal.

- von Golf-Racht, T.O. (1982): Fundamentals of fractured reservoir engineering, Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, 710p.
- Goodman, R.E., Van, T.K. and F.E. Heuze, (1968): The measurement of rock deformability in boreholes, 10th Symp. Rock Mech. Univ. of Texas, pp. 1-45, Austin.
- Gough, D.I. and J.S. Bell (1981): Stress orientation from oil-well fractures in Alberta and Texas, Can. J. Earth Sci., 18, 638-645.
- Gregory, E.C., Rundle, T.A., McCabe, W.M. and K. Kim, (1983): In-situ stress measurement in a jointed basalt: The stability of five overcoring techniques. Rapid Excavation and Tunneling Conference, pp. 1-20, Chicago.
- Greiner, G. (1978): Spannungen in der Erdkruste - Bestimmung und Interpretation am Beispiel von in-situ Messungen im süddeutschen Raum. Diss. Universität Karlsruhe, 192S., Karlsruhe.
- Griggs, D.T. and J. Hardin (1960): Observations on fracture and a hypothesis of earthquakes. In: D.T. Griggs and J. Hardin eds: Rock Deformation, Geol. Soc. Aus., Memoir 79, pp. 347-373.
- Kaiser, R., and G. Gottschalk (1972): Elementare Tests zur Beurteilung von Meßdaten, 68S., Mannheim (B.I.)
- Kirsch, G. (1898): Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre, Z. Ver. dtsh. Ing. 42, 707S.
- Leeman, E.R. (1971): The C.S.I.R. "Doorstopper" and triaxial rock stress measuring instrument. Rock.Mech. 3, pp. 25-50, Wien, New York.
- Mastin, L.G. (1984): The development of borehole breakouts in sandstone. Master Thesis, Stanford University, 101p.
- Müller, W.H. and U. Briegel (1980): Mechanical aspects of the Jura overthrust, Eclogae geol. Helv. 73/1, 239-250.
- Pavoni, N. (1984): Seismotektonik Nordschweiz. NTB (in Vorbereitung).
- Rummel, F., Baumgärtner, J. and H.J. Alheid (1982): Hydraulic fracturing stress measurements along the eastern boundary of the SW-German Block, Proc. of Workshop XVII on Hydraulic Fracturing Stress Measurements, Zoback, M.D. and B.C. Haimson eds: Menlo Park, California, pp. 1-35.

Schneider, T. (1985): Bohrlochrandausbrüche in norddeutschen Bohrungen als Folge tektonischer Spannungen - Theorie und Beobachtungen, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (in Vorbereitung).

Zoback, M.D., Moss, D., Mastin, L.G., and R. Anderson (1984): Wellbore breakouts and in-situ stress, submitted to JGR (in press).

B. Unveröffentlichte Berichte

Blümling, P. und T. Schneider (1984): Bohrlochrandausbrüche der Bohrung Böttstein - Beziehung zum regionalen Spannungsfeld, Bericht

Rummel, F. und G. Möhring-Erdmann (1984): Stabilität von Tiefbohrungen im kristallinen Grundgebirge, Bericht an die Deutsche Forschungsgemeinschaft.

6. Verzeichnis der Abkürzungen

S_H :	maximale horizontale Hauptspannung des primären Spannungsfeldes
S_h :	minimale horizontale Hauptspannung des primären Spannungsfeldes
θ_H :	Richtung von S_H gegen Nord (math. neg.)
θ_h :	Richtung von S_h gegen Nord (math. neg.)
τ_{max} :	maximale Scherspannung
σ_r :	radiale Spannung des sekundären Spannungsfelds in der Umgebung einer Bohrung
σ_θ :	θ -Komponente (Polarkoordinaten) des sekundären Spannungsfeldes in der Umgebung einer Bohrung
$\tau_{r\theta}$:	Scherkomponente (Polarkoordinaten) des sekundären Spannungsfeldes in der Umgebung einer Bohrung
θ :	Winkel gegen S_H (math. pos.)
P:	Manteldruck
E:	Elastizitätsmodul, allgemein
E_G :	Elastizitätsmodul, bestimmt mit der Goodmansonde
E_D :	Elastizitätsmodul, bestimmt im einaxialen Druckversuch
ν :	Poissonzahl
ΔQ :	hydraulische Drucksteigerung
ΔU :	mittlere diametrale Verschiebung in Abhängigkeit von ΔQ
d:	Durchmesser
$K(\nu, \beta)$:	Konstante, Werte vgl. GOODMAN et al. (1968)
SHDT:	Stratigraphic High Resolution Dipmeter Tool
HDT:	High Resolution Dipmeter Tool
BGT:	Borehole Geometry Tool
ϵ_H :	maximale horizontale Hauptdeformation
ϵ_h :	minimale horizontale Hauptdeformation

ϵ_{xx} :

ϵ_{yy} : Komponenten des Deformationstensors

ϵ_{xy} :

T: Streuung

s: Standardabweichung

p: statistische Wahrscheinlichkeit

n: Anzahl der Messungen