

AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN DER DDR
Forschungsbereich Geo- und Kosmoswissenschaften
ZENTRALINSTITUT FÜR PHYSIK DER ERDE

Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde
Nr. 83

**Untersuchungen tektonischer Drucklösungserscheinungen
in Karbonaten**

von

Chr. Janssen

C. H. Friedel

Als Manuskript gedruckt
Potsdam 1985

F 493 / 85 P 206 / 85

	<u>Seite</u>
Inhaltsverzeichnis	2
Vorwort	5
Teil I JANSSEN, Chr.: Zur regionalen Verteilung der Horizontalstylolithen im Tafeldeckgebirge der DDR	
Zusammenfassung	6
1. Wissenschaftliche Zielsetzung	9
2. Grundlagen	10
2.1. Stylolithen	10
2.1.1. Historisches	10
2.1.2. Begriffserklärung	11
2.1.3. Genese der Stylolithen (Drucklösungstheorie)	12
2.1.4. Die Quantifizierung von Drucklösungsvorgängen	15
2.1.5. Analogien zwischen Druck- und Schädelsturen	16
2.2. Sigmoidalklüfte	22
2.2.1. Literaturanalyse	22
2.2.2. Begriffserklärung	23
2.2.3. Sigmoidalklüfte als tektonische Indikationen	24
2.2.4. Zeitliche Anlage der Sigmoidalklüftung	24
2.3. Rupturen	24
2.4. Petrophysikalische Untersuchungen	25
2.4.1. Probennahme	26
2.4.2. Probenvorbereitung	26
2.4.3. Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeiten elastischer Wellen	27
2.4.3.1. Der Prozeß der Anisotropisierung	27
2.4.3.2. Theoretische und experimentelle Grundlagen der Ultraschall- messungen	28
2.4.3.3. Methodik und Versuchsdurchführung der Ultraschallmessungen	31
2.4.4. Röntgentexturanalyse	33
2.4.4.1. Grundlage der Röntgentexturanalyse	33
2.4.4.2. Aufnahmemethodik und Durchführung der Messungen	34
3. Paläospannungsverteilung in den Untersuchungsgebieten	35
3.1. Südthüringisch-Fränkische Scholle	38
3.1.1. Rhön-Scholle	38
3.1.2. Heldburg-Scholle	39
3.1.3. Fränkische Störungszone	40

	<u>Seite</u>	
3.2.	Thüringische Senke	41
3.2.1.	Eichsfeld-Scholle	43
3.2.2.	Ohmgebirgsgrabenzone	43
3.2.3.	Bleicherode-Stadtrodaer Scholle	44
3.2.3.1.	Dün	44
3.2.3.2.	Hainleite	45
3.3.	Subherzyne Senke	47
3.3.1.	Harz-Nordrandstörung	48
3.3.2.	Oschersleben-Bernburger Scholle	52
3.3.2.1.	Huy	52
3.3.2.2.	Hakel	55
3.3.2.3.	Bernburger Sattel	55
3.3.3.	Allertal-Störungszone	57
4.	Mathematische Modellierung der Spannungsverteilung	58
4.1.	Physikalische Voraussetzungen	58
4.2.	Modell I	58
4.3.	Modell II	60
5.	Darstellung und Interpretation der regionalen Untersuchungsergebnisse	61
5.1.	Vorkommen und Ausbildung der Stylolithen und Sigmoidalklüfte	61
5.2.	Morphologie und Geometrie der H.-Stylolithen	63
5.3.	Die räumliche Entwicklung der Paläospannungsverteilung unter Berücksichtigung der mathematischen Modellierung	66
5.3.1.	Allgemeine Aussagen	66
5.3.2.	Beziehungen zum großregionalen Strukturbau	70
5.3.3.	Beziehungen zu lokalen und regionalen Störungen	71
5.4.	Die zeitliche Entwicklung der Paläospannungsverteilung	76
5.4.1.	Aussagen zum Bildungszeitraum der untersuchten Indikationen	76
5.4.2.	Modell der Paläospannungsverteilung	78
5.5.	Ursachen der Spannungsverteilung	79
	Literaturverzeichnis	88
	Verzeichnis der Anlagen	

Teil II FRIEDEL, C.H.: Zur kleintektonischen Analyse, Bewertung und Interpretation
tektonischer Drucklösungserscheinungen

	<u>Seite</u>
Zusammenfassung	95
1. Einleitung	98
2. Tektonische Drucklösungsgefüge in paläozoischen Schiefergebirgskalken	98
2.1. Zur Ausbildung der Schieferungsflächen	99
2.2. Tektonisch beeinflusste Drucklösungsvorgänge auf Schichtflächen (V_{g1} -Stylolithenflächen)	106
2.3. Tektonische und lithofazielle Faktoren	109
2.4. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	110
3. Tektonische Drucklösungserscheinungen in postvariszischen Karbonatgesteinen des Tafeldeckgebirges	111
3.1. Beziehungen zwischen dem rupturrellen Deformationsgefüge und tektonischen Drucklösungserscheinungen	112
3.1.1. Altersbeziehungen zwischen tektonischen Drucklösungsflächen	113
3.1.2. Ergebnisse im Unteren Muschelkalk	115
3.2. Bemerkungen zur Interpretation der Horizontalstylolithen	121
3.2.1. Kluftgebundene Orthogonalsysteme	121
3.2.2. Drucklösungserscheinungen in Störungsbereichen (Störungs kinematik)	123
4. Faktoren und Bedeutung des Lösungstransportes	125
Literaturverzeichnis	126

JANSSEN, Chr.; FRIEDEL, C.H.: Untersuchungen
tektonischer Drucklösungserscheinungen
in Karbonaten.
Veröff. Zentralinst. Physik der Erde 83

Korrekturen

- S. 17, 2. Absatz, Zeile 9: statt Ostseeogenese lies
Osteogenese
- S. 35, Zeilen 11 und 10 von unten: statt Anlagen 2 und 3
lies Anlagen 1 und 2
- S. 64, Zeile 17 von unten: (Abb. 28 j) ist zu streichen
- S. 87 Legende zu den Strukturbereichen ist zu ergänzen:
XVIII - Rhönscholle
XIX - Heldburg-Scholle
XX - Fränkische Störung
- S. 90 FRIEDEL, C.H.: Zur kleintektonischen Analyse,
Bewertung und Interpretation tektonischer
Drucklösungserscheinungen.-
Veröff. Zentralinst. Physik Erde, Potsdam
83 (1985), S. 95-133

Vorwort

Im vorliegenden Heft werden in zwei Beiträgen Untersuchungsergebnisse vorgestellt, die vor allem im Zusammenhang mit der Bearbeitung tektonischer Drucklösungserscheinungen in Karbonaten gewonnen wurden. Beide Arbeiten greifen thematisch ineinander, doch weisen sie in ihren Schwerpunkten auch deutliche Unterschiede auf.

Im ersten Beitrag (JANSSEN) wird das Ziel verfolgt, die Entwicklung der Paläospannungsverteilung für das Deckgebirge der DDR zu rekonstruieren. Diese Rekonstruktion basiert insbesondere auf einer regional angelegten Erfassung von Horizontalstylolithenrichtungen in unterschiedlichen stratigraphischen Niveaus. Die große Anzahl von Messungen erlaubt eine detaillierte Darstellung für die wesentlichsten regionalgeologischen Einheiten des Tafeldeckgebirgsstockwerkes des Südtails der DDR. In die Bewertung sind die Ergebnisse ergänzender kleintektonischer Aufnahmen, petrophysikalischer Untersuchungen (Anisotropiebestimmungen) und mathematische Modellvorstellungen integriert.

Im zweiten Beitrag (FRIEDEL) werden tektonische Drucklösungserscheinungen im paläozoischen Schiefergebirge und im Tafeldeckgebirge einer vergleichenden Analyse unterzogen. Es wird u.a. der Frage nachgegangen, ob und unter welchen Voraussetzungen Stylolithen zur Kennzeichnung tektonischer, sich im Deformationsgefüge abbildender Paläospannungen herangezogen werden können. Neben der Darstellung der Stylolithenrichtungen erfolgt im stärkeren Maße die Erfassung des Rupturengefüges (Beziehungen zwischen Drucklösung und Rupturenbildung). Durch die auf einzelne Aufschlüsse beschränkte, eingehende kleintektonische Bearbeitung ergibt sich die Möglichkeit, regional gewonnene Ergebnisse im Detail (Einzelaufschluß) zu überprüfen und zu analysieren.

Daraus resultieren gewisse Meinungsverschiedenheiten zwischen den Autoren, die z.B. die Bewertung der Horizontalstylolithen betreffen. Dessen ungeachtet ergibt sich durch die gemeinsame Publikation beider Arbeiten die willkommene Gelegenheit, mit unterschiedlichen Schwerpunkten auf bestehende Probleme hinzuweisen und einige Lösungsvarianten anzubieten.

Die Verfasser danken zahlreichen Fachkollegen für wertvolle Diskussionen, für die Gewährung technischer Hilfe und für das rege Interesse, welches diesen Arbeiten bis zur Fertigstellung entgegengebracht wurde. Für die Möglichkeit, die erreichten Ergebnisse in den Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde zu publizieren, möchten wir uns bei der Leitung des Institutes und ganz besonders bei Herrn Prof. Dr. Jubitz bedanken.

Zur regionalen Verteilung der Horizontalstylolithen im Tafeldeckgebirge der DDR

von Christoph Janssen^Y

Zusammenfassung

Ausgehend von der Zielsetzung einer Rekonstruktion der Paläospannungsverteilung am Südrand der Nordostdeutschen Senke erfolgten tektonische, petrophysikalische und gefügekundliche Untersuchungen in unterschiedlichen Regionaleinheiten. Bei der Interpretation der Ergebnisse flossen Überlegungen der mathematisch modellierten Spannungsverteilung mit ein. Den Schwerpunkt innerhalb der geotektonischen Untersuchungsmethodik bildeten die tektonischen Stylolithen. Deshalb wurden den Fragestellungen der Genese (Drucklösungstheorie), Klassifizierung und Interpretation der Stylolithen breiter Raum eingeräumt. Die vergleichenden Untersuchungen an Schädelnähten zeigten Analogien zwischen Druck- und Schädelsturen auf. Die petrophysikalischen Untersuchungen verfolgten das Ziel, die Ergebnisse der tektonischen Geländeaufnahmen zu ergänzen und zu modifizieren.

Die regionale Analyse der Paläospannungsverteilung auf der Grundlage der geschilderten Methoden ergab im wesentlichen folgende Ergebnisse:

- a) Die Bindung der tektonischen Stylolithen an den großregionalen Strukturbau.
- b) Eine Änderung der tektonischen Stylolithenverteilung in Bereichen regionaler und lokaler Störungszonen.

Die Bindung an den großregionalen Strukturbau wird besonders deutlich bei einem Vergleich der Hauptrichtungen der tektonischen Stylolithen (1. Maximum) mit den Mächtigkeitsgradienten der Terebratelzone (Anlage 5). Die immer wieder durchschlagende rheinische Richtungsgruppe bildet dabei drei rhenotype Strukturachsen, von denen sich zwei ausgehend von der Südthüringisch-Fränkischen Scholle bis zur Allertal-Störungzone verfolgen lassen. Die Einflußnahme der Störungen auf die lokale Spannungsverteilung konnte ausgehend von einem theoretischen Modell an konkreten Beispielen nachgewiesen werden. Dabei wurde deutlich, daß eine Spannungsverteilung mit rheinisch orientierter Hauptnormalspannung nicht im Widerspruch zu herzynischen Richtungsmaxima in Bereichen lokaler und regionaler Störungszonen steht. Die lokalen Spannungsänderungen werden entscheidend vom tektonischen Bau und der zeitlichen Anlage der Störung bestimmt. Als Wirkungszeitraum der Mehrzahl der untersuchten Indikationen wird der Zeitabschnitt Zechstein-Trias angenommen.

^Y Zentralinstitut für Physik der Erde, 1500 Potsdam

Аннотация

Исходя из поставленной задачи реконструкции распределения палеонапряжения южного края Северо-Германской низменности, последовали тектонические, петрофизические и петротектонические исследования различных региональных единиц. При интерпретации результатов сюда вошли также и результаты математически моделированного распределения напряжения. Главное в рамках геотектонического метода исследования были тектонические стилолиты. Поэтому было оставлено обширное место для постановки вопросов генезиса (теория выщелачивания при сжатии), классификации и интерпретации стилолитов. Сравнительные исследования черепных швов показали сходство между сутурами и черепными швами. Петрофизические исследования имели своей целью дополнить и модифицировать результаты тектонических съемок местности.

Региональный анализ распределения палеонапряжения на основе указанных методов показал в основном следующие результаты:

- а) связь N-стилолитов с общим региональным структурным строением,
- б) изменение распределения тектонических стилолитов в оасти региональных и локальных зон возмущения.

Связь с общим региональным структурным строением становится особенно заметной при сравнении главных направлений тектонических стилолитов (I. максимум) с градиентами мощности тереорателловой зоны (приложение 5). Пробивающаяся все вновь и вновь Рейнская группа направления при этом образует три ренотипные структурные оси, из которых за двумя можно основательно проследить от Южнотюрингского-Франкского массива до зоны возмущения Аллерталь. Влияние возмущений на локальное распределение напряжения основательно удалось доказать на теоретической модели при помощи примеров. При этом выяснилось, что распределение напряжения с ориентированным с сторону Рейна нормальным напряжением (главным), не находится в противоречии с герцинской нормой в оасти локальных и региональных зон возмущения. Локальные изменения напряжения в решающей мере зависят от тектонического строения и места действия возмущения. За время действия оольшинства исследованных индикаций принимает отрезок времени цехштейн-триас.

Summary

With the aim of a reconstruction of the paleostress distribution at the south border of the North-East German Depression, tectonic, petrophysical and structural investigations were carried out in different regional units. Considerations concerning the mathematically modelled stress distribution were included in the interpretation of the results. The emphasis in the geotectonic methods of investigation was on the tectonic stylolites. Therefore much room was given to the problems of genesis (pressure solution theory), classification and interpretation of the stylolites. The comparative investigations of cranial sutures showed analogies between stylolitic structures and cranial sutures. The petrophysical investigations were intended to supplement and modify the results of the tectonic surveys.

In substance, the results of the regional analysis of the paleostress distribution on the basis of the methods described above were as follows:

- a) The dependence of the tectonic stylolites upon the large-regional structure
- b) A change of the distribution of tectonic stylolites in ranges of regional and local fault zones

The dependence on the large-regional structure is most clearly observable from a comparison of the principal orientations of the tectonic stylolites (1st maximum) with the thickness gradients of the Terebratula zone (Annex 5). The Rhenish group of orientations that appears again and again shows three rhenotype structural axes, two of which can be traced from the South Thuringian - Frankish block to the Aller valley fault zone. Starting from a theoretical model, the influence exerted by the faults on the local stress distribution could be shown by means of concrete examples. Here it became clear that a stress distribution with a principal normal stress of Rhenish orientation is not contradictory to Hercynian direction maxima within local and regional fault zones. The local stress variations are decisively determined by the tectonic structure of the fault and its development in time. The period of influence of most of the indications investigated is assumed to be the Zechstein/Triassic era.

1. Wissenschaftliche Zielsetzung

Bei den Forschungsarbeiten zur Analyse des Beckenbildungsprozesses kommt der tektonischen Deformation des Deckgebirges im Zusammenhang mit den tektonischen Differenzierungsprozessen eine besondere Rolle zu.

Aus diesem Grunde wurden in den letzten Jahren verstärkte Anstrengungen unternommen, um den tektonischen Prozeßablauf und seine Auswirkungen auf den Deformationszustand der Nordostdeutschen Senke zu interpretieren. Dabei standen bislang paläotektonische Aspekte im Mittelpunkt der Untersuchungen (SCHWAB u.a. 1975, SCHWAB u.a. 1973, NÖLDEKE & SCHWAB 1975). Um weitergehende Aussagen zu treffen, ist in diesem Zusammenhang eine intensive Analyse der Paläospannungsverteilung erforderlich. Dafür bieten sich zwei ergänzende, methodisch verschiedene Wege an:

1. Analyse großräumiger tektonischer Bewegungsabläufe und Bruchstrukturen und der damit verbundenen Spannungsverteilung (ILLIES 1974, RICHTER-BERNBURG 1974, SCHWAB u.a. 1979, HESSMANN & SCHWANDT 1981).
2. Kleintektonische Untersuchungen an Rupturen, Stylolithen u.a. im Aufschlußbereich (WAGNER 1958, 1964 und 1967, PLESSMANN 1972, HORTENBACH 1977, KURZE & NECKE 1979, HOSSEINIDUST 1980, BANKWITZ 1982).

Ziel dieser Arbeit ist es, ausgehend von kleintektonischen Untersuchungen im Tafeldeckgebirge und unter Berücksichtigung überregionaler Zusammenhänge, zu einer qualifizierten Spannungsanalyse des Paläozustandes am Südrand der Nordostdeutschen Senke zu gelangen. Bei der Interpretation fließen die aus den Nachbargebieten (BRD, VR Polen, Schweiz, Frankreich) bekannten Untersuchungsergebnisse (WAGNER 1964, ARTHAUD & MATTAUER 1972, BUCHNER 1978, SWIDROWSKA 1980, OELKE & WEIRICH 1981 u.a.; vgl. Abschnitt 5.3.) mit ein.

Folgende Merkmale des kleintektonischen Gefügeinventars wurden aufgenommen und für die Interpretation herangezogen: Horizontalstylolithen, Sigmoidalklüfte, Klüfte, linsige Zerscherungen, Störungen, Harnische und Striemung. Den Schwerpunkt innerhalb des tektonischen Untersuchungsteils bildeten die Aufnahmen und Interpretation der Horizontalstylolithen. Deshalb wurde auch den über die Stylolithenorientierung hinausgehenden Problemen (Genese, Klassifizierung und Analogien der Drucksuturen) breiter Raum eingeräumt.

Weiterhin wurden Ausbreitungsgeschwindigkeiten elastischer Wellen an 200 orientierten Gesteinsproben auf laborativem Wege bestimmt. Ziel der petrophysikalischen Untersuchungen ist der Nachweis von Anisotropien im Gestein, die auf die Wirkung von Paläospannungen zurückgeführt werden können.

Auf der Grundlage der bisherigen Erkenntnisse, der gewählten Zielstellung und der Aufschlußverhältnisse wurden Karbonatgesteine aus dem Muschelkalk, dem Zechstein und aus der Oberkreide als geeignete Untersuchungsobjekte ausgewählt. Partiiell wurden die Untersuchungen auf Rogensteine des Unteren Buntsandsteins erweitert.

Die Auswahl der karbonatischen Gesteine (in erster Linie aus dem Muschelkalk) hat folgende Ursachen:

4. Große regionale Verbreitung
2. Günstige Aufschlußverhältnisse
3. Hoher Informationsgehalt (Horizontalstylolithen, Sigmoidalklüfte)

Regional umfaßt die Untersuchung folgende Gebiete:

1. Subherzyne Senke
2. Thüringische Senke
3. Südthüringisch-Fränkische Scholle.

2. Grundlagen

2.1. Stylolithen

2.1.1. Historisches

Der Begriff Stylolith wurde erstmals 1828 in der Literatur erwähnt. KLÖDEN bezeichnete damit seine zuerst im Rüdersdorfer Muschelkalk wahrgenommenen und beschriebenen "säulen-, kegel-, ruinen-, zapfen- und treppenförmigen Gebilde". Ihre Entstehung glaubte er durch die Annahme erklären zu können, daß eine im Kalkschlamm gebettete Quallenhaut durch ihre Zwischenlagerung den Absonderungsflächen ihre Entstehung, Form und Dauer gegeben habe (KLÖDEN 1828, zit. aus PLIENINGER 1852).

QUENSTEDT (1837, zit. aus PLIENINGER 1852) erkannte erstmals, daß es sich bei den Stylolithen um anorganische Bildungen handelt, wobei er eine Beziehung zwischen dem Vorhandensein der Stylolithen und den Pecten herstellte. Er schrieb: "Die Stylolithen sind durch organische Körper geleitete Absonderungen nur von denjenigen "bestimmte Formen" geltend gemacht werden wollte, welche an einer ihrer Grundflächen, meist der oberen, wobei dann die Säulen senkrecht in der Gebirgsmasse stehen, eine Muschel horizontal, nur durch einen hohen, mit Tonletten gefüllten Raum getrennt, aufgelagert haben, und deren Seitenflächen genau den Rand der Muschel nachahmen, wie wenn die Muschel in senkrechter Richtung auf ihre Fläche eine Strecke von etlichen Zollen weit durch die weiche Gebirgsmasse geschoben worden wäre."

PLIENINGER (1852) sprach sich gleichfalls für eine anorganische Entstehung der Stylolithen aus, widerlegte aber eindrucksvoll die scheinbare Abhängigkeit der Stylolithenbildung von organischen Körpern. REIS (1902) war der erste, der darauf hinwies, daß die "Stylolithenbildung im gefesteten Gestein stattgefunden haben müsse". Er führte weiter aus, daß der Entstehung Auflösungsvorgänge zugrunde liegen.

Nachdem die Genese der Stylolithen durch die Drucklösungstheorie im wesentlichen geklärt werden konnte (vgl. Abschn. 2.1.3.), setzte weltweit - ausgehend von den klassischen Stylolithenfundpunkten aus den Muschelkalkaufschlüssen Süd- und Mitteldeutschlands - eine intensive Forschungstätigkeit zu den Problemen der Anwendung und Klassifikation der Stylolithen ein.

Insgesamt wird deutlich, daß die Literatur über Stylolithen ungewöhnlich umfangreich ist. Eine Analyse der zu diesem Thema erschienenen Arbeiten läßt zwei Richtungen erkennen:

Die Mehrzahl ist beschreibend und konzentriert sich auf eine Richtungsanalyse (u.a. G.H. WAGNER 1958, 1964 und 1967; BEIERSDORF 1969; PLESSMANN 1972; HANCOCK & ATIYA 1979; KURZE & NECKE 1979; BUCHNER 1978, 1981). Arbeiten mit genetischer und substanzieller Orientierung sind deutlich in der Minderzahl (u.a. TRURNIT 1967, 1969 und 1979; DELAIR & LEROUX 1978; SCHWANDER, BÜRGIN, STERN 1981).

2.1.2. Begriffserläuterungen

Die Begriffserläuterungen erfolgen im wesentlichen nach WAGNER (1964) und BEIERSDORF (1969).

Stylolithen

Stylolithen (griech. *stylos* = Griffel) gehören zu den Grenzflächen im Gestein, die durch Drucklösung entstehen (Drucksuturen bzw. Drucknähte). Hierbei verzahnen sich die angrenzenden Schichten in Form von zapfenförmigen, längsgerieften Lösungskörpern, den eigentlichen Stylolithen. (Abb. 1 und 2)

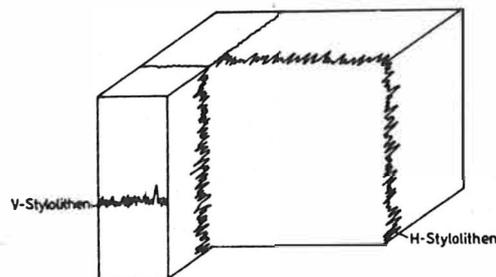


Abb. 1 V.- und H.-Stylolithen im Raumbild nach WAGNER (1964)

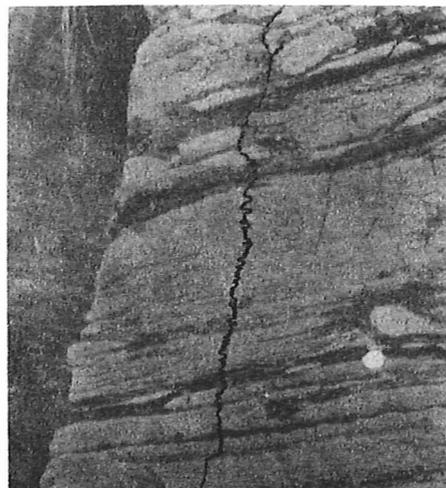


Abb. 2 H.-Stylolithen im Aufschluß Rüdersdorf (Bereich der Kreuzbrückenspalte)

Als Stylolithenfläche bezeichnet man die Gesamtheit einer mit kegel- bzw. kegelförmigen Stylolithen besetzten Fläche. Im Querschnitt ergibt sich das Bild einer häufig schädelnahtähnlich gezackten Linie (engl. stylolic seam, Abb. 3).

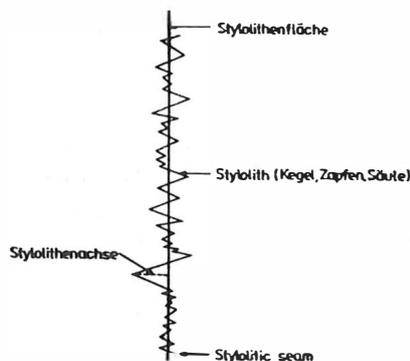


Abb. 3 Drucksutur nach WAGNER (1964)

Nach ihrer Orientierung im Gestein werden unterschieden:

Vertikalstylolithen (V.-Stylolithen, Abb. 1 / Synonyma: "stehende Stylolithen" - G.H. WAGNER 1913, zit. aus BEIERSDORF 1969). V.-Stylolithen entstehen in der Regel durch Belastungsdruck während der Diagenese.

In Einzelbeispielen konnten auch Vertikalstylolithen beobachtet werden, die sich nach Abschluß der Diagenese und im Zusammenhang mit echten tektonischen Bewegungen gebildet haben (ARTHAUD & MATTAUER 1972).

Horizontalstylolithen (H.-Stylolithen, Abb. 1 / Synonyma: "liegende Stylolithen" - G.H. WAGNER 1913, zit. aus BEIERSDORF 1969). H.-Stylolithen entstehen nach der Auffassung der Mehrzahl der Bearbeiter durch lateral wirkende Druckspannungen im Spätstadium der Diagenese.

In der Ausbildung gibt es keine Unterschiede zwischen V.- und H.-Stylolithen. Die Achsen der Stylolithenzapfen folgen jeweils der Richtung der Kompressionsspannung, im folgenden als Stylolithenrichtung bezeichnet.

Unter Berücksichtigung weiterer Gefügeelemente (Klüfte, Wellenstreifen u.a.; vgl. FRIEDEL 1985) ergibt sich somit die Möglichkeit einer Rekonstruktion der Paläospannungsverteilung im Tafeldeckgebirge.

2.1.3. Genese der Stylolithen (Drucklösungstheorie)

Nach der Drucklösungstheorie entstehen Stylolithen dann, wenn zwei Gesteinsflächen an Rupturen (Risse, Klüfte, Schichtfugen) gegeneinander gepreßt werden (punktförmiger Drucklösungskontakt, de BOER 1977) und an den Berührungspunkten Druck- und Lösungsun-

terschiede auftreten, d.h., die Drucklösung erfolgt an den Kontaktstellen der Mineralkörner, die im Vergleich zur Umgebung unter erhöhtem Druck stehen. Die Differenz zwischen dem petrostatischen Druck in den Kontaktbereichen und dem hydrostatischen Druck in den Porenräumen bewirkt eine unterschiedliche Löslichkeit und somit eine Lösungsfällungsreaktion nach dem RIECKE'schen Prinzip (HORTENBACH 1977), wobei eine Stoffabwanderung von der stärker beanspruchten Stelle in den Druckschatten stattfindet. Der petrostatische Druck wird nicht durch die flüssige Phase übertragen, sondern wirkt nur auf die feste Phase.

Unter Beteiligung von Lösungsmitteln (mineralische Schichtwässer) entstehen durch Drucklösung und gerichtetem Wachstum Körper in Form von Kegeln, Kegelstümpfen und Säulen, die Stylolithenzapfen. Ihre größte Verbreitung liegt in Karbonatgesteinen. Sie können darüber hinaus aber auch in anderen Sedimentiten auftreten (TRURNIT 1967).

Die erste wissenschaftliche Erklärung über Drucklösungsphänomene wurde durch SORBY 1863 publiziert (zit. aus TRURNIT 1969), nachdem THOMSON 1862 (zit. aus TRURNIT 1969) dafür die physikochemischen Grundlagen geschaffen hatte.

Die Erscheinung der erhöhten Löslichkeit eines Minerals unter einseitigem Druck oder Zug wurde erstmals von RIECKE 1894 (zit. aus TRURNIT 1969) beobachtet und als RIECKE'sches Prinzip in die Literatur übernommen. Auch CORRENS (1949) erkannte, daß Kristalle, die nicht unter Druck stehen, auf Kosten der Beanspruchten wachsen. Bei zunehmender Übersättigung des Lösungsmittels sind erhöhte Drücke erforderlich, um die Löslichkeit zu erhalten.

Nach dem Gesetz von CORRENS gilt:

$$(1) \quad P = \frac{R \cdot T}{V} \ln \frac{c}{c_s}$$

Dabei bedeuten: P = Überdruck in Atmosphären
 R = Gaskonstante (0,082037/Atm)
 T = absolute Temperatur
 c = gegebene Konzentration
 c_s = Sättigungskonzentration ohne Druckeinwirkung
 V = Molvolumen der Substanz im Kristall

Der Druck P ist dem natürlichen Logarithmus der Konzentration direkt proportional, d.h., ist die Konzentration höher als der dazugehörige Druck (Übersättigung) wird ausgeschieden. Ist aber umgekehrt der Druck höher als die Konzentration (Untersättigung), wird gelöst und an unter gleichförmigen Druck stehenden Flächen wieder ausgeschieden (RIECKE'sches Prinzip / TRURNIT 1969).

Den Prozeß der Stylolithenbildung kann man mit dem Drucklösungsvorgang vergleichen, wie er von BATHURST (1958) für Kristallkornkontakte beschrieben wurde:

Nach BATHURST vollzieht sich die Auflösung der Körner an einer Stelle, wo sie in direktem Kontakt mit der Porenflüssigkeit stehen. Durch hohe Scherspannung kommt es zur Auflösung der Ränder des Kornkontaktes, daran anschließend zum Zusammenbruch und zum Neubeginn des Prozesses (Abb. 4).

WEIL (1959), zit. aus de BOER 1977) sieht im Gegensatz zu BATHURST nicht in der Scherspannung, sondern in der einfachen Kompressionskraft innerhalb der Korngrenzen die Ursache für das Phänomen der Drucklösung.

De BOER (1977) überprüfte beide Theorien mit Hilfe thermodynamischer Gleichungssysteme und laborativer Experimente. Er gelangte zu der Auffassung, daß die Spannung außerhalb des Kornkontaktes nur einen geringen Einfluß auf die Löslichkeit ausübt und entschied sich folglich für das WEIL'sche Modell.

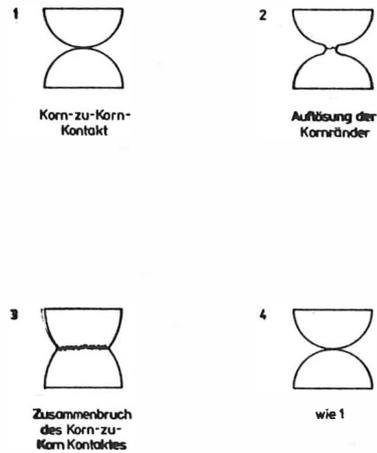


Abb. 4 Prinzip der Drucklösung nach BATHURST (vereinfacht aus de BOER 1977)

Biochemische Prozesse fördern den Drucklösungsprozeß (MEINHOLD 1977), da sie die in Sedimenten vorhandenen organischen Substanzen zersetzen. Es bilden sich CO_2 , SO_2 , H_2O und organische Säuren, die den Lösungsprozeß und somit die Stylolithenbildung beschleunigen.

In relativ reinen Gesteinen, d.h. ohne Beimengungen anderer Minerale, ist die Drucklösungsintensität gering, während bereits bei kleineren Verunreinigungen verstärkte Drucklösungserscheinungen auftreten. Speziell Tonminerale tragen zur Erhöhung der Drucklösung bei (TRURNIT & AMSTUTZ 1979). Besonders Illit begünstigt die Stylolithenbildung (BLANCHER & WHITACKER 1978, zit. aus BUCHNER 1978).

Nach Untersuchungen von TRURNIT (1969) treten Stylolithen bevorzugt zwischen Partnern gleicher oder ähnlicher relativer Drucklöslichkeit auf, wobei der Kontakt mit wässriger Lösung eine Voraussetzung darstellt. Werden beide Partner gelöst, entwickeln sich suturierte Drucklösungskontaktflächen (Abb. 5).

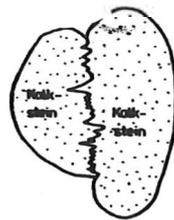


Abb. 5 Suturierte Drucklösungskontaktfläche bei Partnern gleicher oder ähnlicher relativer Drucklöslichkeit nach TRURNIT (1969)

Partner unterschiedlicher Drucklöslichkeit entwickeln nur glatte Drucklösungskontakte, da nur ein Partner gelöst wird (Abb. 6).

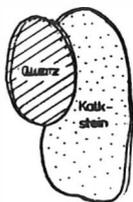


Abb. 6 Glatte Drucklösungskontakte bei Partnern unterschiedlicher Drucklöslichkeit nach TRURNIT (1969)

Der Absatz des gelösten Materials erfolgt entweder bereits im Druckschatten (RICHTER 1958, zit. aus BUCHNER 1978) oder nach dem Transport über größere Strecken, wobei sich unlösliche Komponenten wie Quarz, Kalifeldspat, Tonminerale und Pyrit anreichern und sich Stylolithensäume bilden (SCHWANDER, BURGİN, SCHWAN 1981). Kommt es zur Störung oder Behinderung des Abtransportes des gelösten Materials, setzt die Drucklösung aus (HORTENBACH 1977).

DEELMAN (1975) lehnt eine Entstehung der Stylolithen durch Drucklösung ab. Er geht davon aus, daß durch Spannungseinwirkungen an den einzelnen Kontaktstellen lokale Spannungswerte entstehen, die höher sind als die Plastizitätsgrenzen und somit eine plastische Deformierung des festen und trockenen Materials ermöglichen. Die Auswertung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen zeigt aber deutliche Lösungsrückstände, so daß in der Mehrzahl mit echter Drucklösung gerechnet werden kann. Das bedeutet aber nicht, daß die Stylolithenbildung durch plastische Deformierung im Einzelfall ausgeschlossen wird.

GUZETTA (1984) geht im Zusammenhang mit der Stylolithengenesen von physikalischen Bildungsbedingungen aus, die sich von der herkömmlichen Drucklösungstheorie unterscheiden. Er beschreibt den Lösungsvorgang in Abhängigkeit von einer spontanen Polarisation zwischen den Gesteinsgrenzen, vergleichbar mit den Vorgängen in einem ferroelektrischen Kristall.

2.1.4. Die Quantifizierung von Drucklösungsvorgängen

Nach HORTENBACH (1977) ergeben sich Hinweise zum Ausmaß der Drucklösung, wenn man die Zapfenlänge der Stylolithen (Amplitude der Stylolithen) addiert und zur Aufschlußlänge in Beziehung setzt. Aus der Häufigkeit der Drucklösungsflächen, der Höhe der Einzelstylolithen (Amplitude) sowie der Menge und Zusammensetzung des angesammelten Lösungsrückstandes lassen sich Rückschlüsse auf die Intensität der Drucklösung ziehen. Die Drucklösung kann nach der Gleichung

$$(2) \quad D_l = \frac{\text{Amplitude}}{\text{Amplitude} + \text{Meßstrecke}} \cdot 100$$

bestimmt werden. Dabei entspricht die Höhe der Einzelstylolithen dem Mindestbetrag an aufgelöstem Material, während die Prozentzahl auf die Ausgangsmächtigkeit des Gesteins bezogen ist (HORTENBACH 1977). Als Beispiel für Drucklösungsbeträge wurde von HORTENBACH Maximalwerte von 20 bis 25 %, STOCKDALE (1926, zit. aus HORTENBACH 1977) 23 bis 34 % und von DUNNIGTON (1967, zit. aus HORTENBACH 1977) 20 bis 25 % angegeben.

Weitere Möglichkeiten der Quantifizierung von Drucklösungsprozessen findet man bei DELAIR & LEROUX (1978) und bei SCHWANDER, BURGİN und SCHWAN (1981). Letztere Autorengruppe ermittelte das Ausmaß der Drucklösung auf der Basis geochemischer Untersuchungen. Sie gelangte dabei zu wesentlich geringeren Drucklösungsbeträgen (6 %).

2.1.5. Analogien zwischen Druck- und Schädelsturen

Als Fazit der im Abschnitt 2.1.3. gemachten Ausführungen können wir verallgemeinern, daß Stylolithen in der Regel als Ergebnis von Drucklösungsprozessen entstehen. Die theoretischen Grundlagen der Drucksuturbildung wurden aufgrund der bekannten Zusammenhänge aus der Literatur ausführlich beschrieben. Unbefriedigend sind die Angaben über experimentelle Versuche.

In dieser Situation stellt sich die Frage, inwieweit die auffällige Ähnlichkeit im Erscheinungsbild der sogenannten Nähte im knöchernen menschlichen Schädeldach und den Drucksuturen im Gestein (Abb. 7) auf genetischen Zusammenhängen beruht.

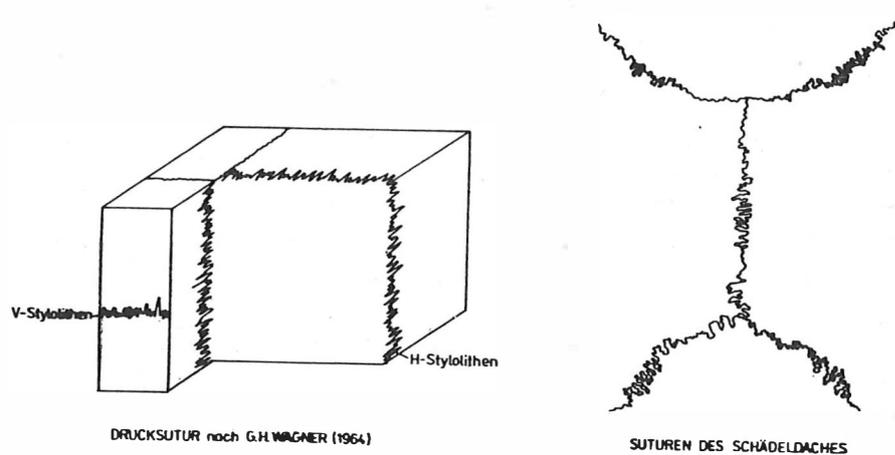


Abb. 7 Schema von Drucksuturen im Karbonatgestein und Suturen des menschlichen Schädeldaches nach JANSSEN & CREUTZ (1981)

Es wird davon ausgegangen, daß erkennbare Analogien zwischen dem rein anorganischen Prozeß der Drucksuturbildung in Karbonatgesteinen und jenen Wachstumsprozessen der menschlichen Kalottennähte auf der Grundlage vermuteter Grenzflächenprozesse von organischen und anorganischen Systemen beruhen.

Im folgenden wird auf Ergebnisse eingegangen, die der Verfasser gemeinsam mit Dr. CREUTZ (Naturkundemuseum Berlin) erzielte (vgl. JANSSEN & CREUTZ 1981).

Die Befähigung lebender Organismen zur "Biomineralisation" spielt - phylogenetisch seit dem Kambrium - vor allem im Tierreich eine große Rolle. Es handelt sich dabei um spezifische Stoffwechselfvorgänge, bei denen neben organisch-chemischen Matrixstoffen schließlich auch mineralische Komponenten entstehen und die Erzeugung skelettaler Hartteile ("Biomineralisat") ermöglichen. Die Minerale - vorwiegend des Kalziumcarbonats, des Kalziumphosphats und der SiO_2 -Gruppe - liegen in der Regel im kristallinen Zustand als kleine Biokristalle vor; sie unterscheiden sich weder in ihren kristallographischen Eigenschaften, ihrer stofflichen Zusammensetzung noch in ihren Wachstumserscheinungen von den in anorganischer Umgebung entstandenen Kristallen desselben Minerals. Der einzige Unterschied besteht darin, daß Biokristalle das Ergebnis der Aktivität lebender Zellen sind (ERBEN 1978).

Dieser Tatbestand gilt grundsätzlich auch für "den Knochen" der Wirbeltiere (vgl. JANSSEN & CREUTZ 1981). Allerdings liegen hier die Verhältnisse wesentlich komplizierter, denn die anorganisch-mineralische Fraktion ist in ein hierarchisch aufgebautes Struktursystem integriert, dessen insgesamt sechs nach PETERSEN (1930) unterscheidbare Ordnungen von der Molekularstruktur der Komponenten des Knochengewebes (VI) über die organischen Fasern mit ihrem Kristallmantel (V), die Lamellen (IV), die Lamellensysteme (III), die spezifische Zusammenfügung der Lamellensysteme an den verschiedenen Skelettorten (II) bis hin zur Kompakta-Spongiosa-Verteilung im definitiven Knochen (I) reichen. Ostseegenese bedeutet also stets Bildung einer bestimmten Struktur, die zudem infolge fortwährender innerer Umgestaltungsprozesse durch An- und Abbau von Knochensubstanz zeitlebens außerordentlich empfindlich gegenüber äußeren Einflüssen bleibt. Kurz ausgedrückt beruht die Bildung von Knochen auf der Verkalkung von Bindegewebe (JANSSEN & CREUTZ 1981).

Die individuelle Größenzunahme der Knochen erfolgt nach JANSSEN & CREUTZ (1981) vornehmlich in sog. Wachstumsfugen bzw. auch durch Apposition auf den Knochenoberflächen; sie gilt als abgeschlossen, wenn die knorpeligen Wachstumsfugen morphologisch verschwinden (verknöchern), was beim Menschen im Alter zwischen 18 und 21 Jahren geschieht. Die Deckknochen des Schädeldaches verhalten sich dagegen anders. Sie werden nicht knorpelig vorgebildet, sind also keine "Ersatzknochen" wie die übrigen Skelettelemente (mit Ausnahme Clavicula). Als Ossifikationsgrundlage dient hier sehniges Bindegewebe, das von bestimmten Zentren her mehr oder weniger radiär fortschreitend verkalkt. Nach der gegenseitigen Berührung der einzelnen Knochenplatten kommt es zur Ausbildung einer spezifischen Art von Wachstumsfugen. Hierbei auftretende Kompressionsspannungen führen zusammen mit dem durch das Hirnwachstum ausgelösten hydrostatischen Druck ("das Gehirn formt sich seine Schädelhöhle!") zum charakteristischen Bild der sog. Schädelnähte (JANSSEN & CREUTZ 1981, Abb. 8).

Analog zur Ruptur im Gestein treten im Bereich der Wachstumsfugen Druck- und Lösungsunterschiede auf, die den Drucklösungsprozeß bewirken und letztlich die suturartige Verwachsung der Schädelknochen verursachen. Da diese Wachstumsvorgänge in überschaubarer Zeit ablaufen bzw. die einzelnen Stadien individuell belegbar sind, könnten sie für Mineralogen und Geologen zu einem willkommenen Modell beim Studium von Drucksuturen im Gestein werden. Es ergäben sich dann folgende Analogien (JANSSEN & CREUTZ 1981):

- Anfangsstadium (Abb. 9 a): "offene Wachstumsfuge (Schädel von Fetus und Säugling) - entspricht der offenen Ruptur im Gestein.
- Stadium der beginnenden Drucklösung (Abb. 9 b): vollständig vorhandene, "geschlossene" Wachstumsfuge (1. und 2. Lebensjahr) - entspricht der geschlossenen Ruptur im Gestein verbunden mit dem Beginn der Styolithenbildung.
- Vollständig ausgebildete Suture (Abb. 9 c): feste Verzahnung der daran beteiligten Plattenknochen (etwa ab 20. Lebensjahr) - entspricht den Styolithen in Karbonatgesteinen.
- Verschwinden der Suture (Abb. 9 d): vollkommene Verwachsung der benachbarten Plattenknochen (dieses Stadium gehört zum Greisenalter, zeigt aber eine außerordentliche Variationsbreite) - entspricht dem von TRUNNIT und AMSTUTZ (1979) beschriebenen Alterungsprozeß stylolithischer Drucklösungsfugen.

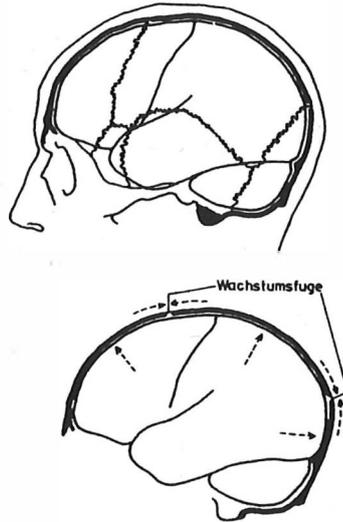


Abb. 8 Durch Wachstum von Gehirn und Schädelknochen ausgelöste Spannungsverteilung in der Calotte nach J. JANSEN & G. GUNTZ (1961)

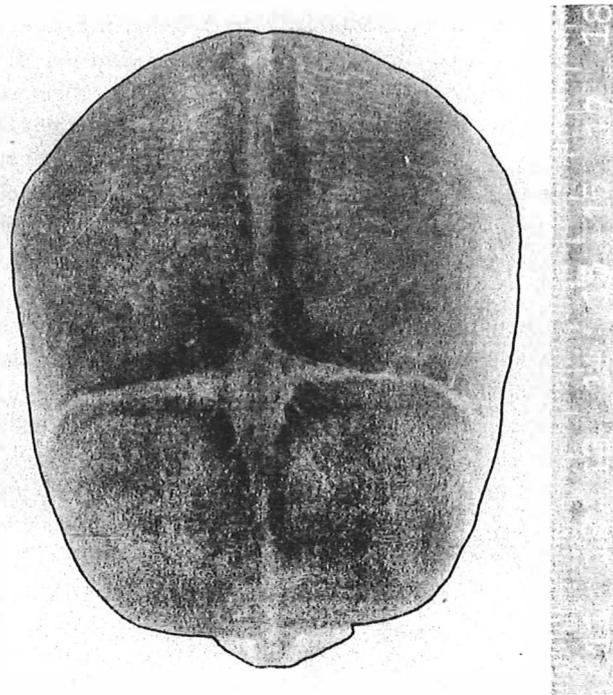


Abb. 9 Offene Wachstumsfuge eines Schädels; aus JANSEN & GUNTZ (1961)

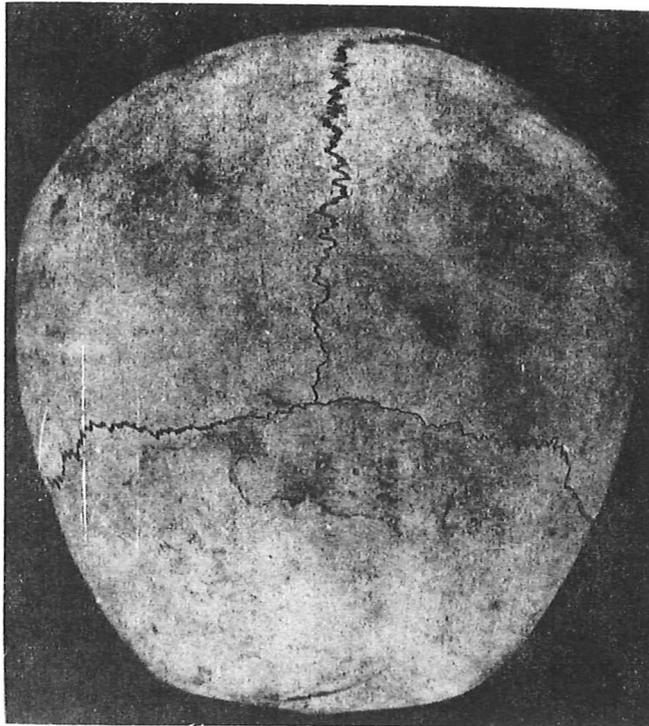


Abb. 9 b Geschlossene Wachstumsfuge eines Schädels; aus JANSSEN & CREUTZ (1981)

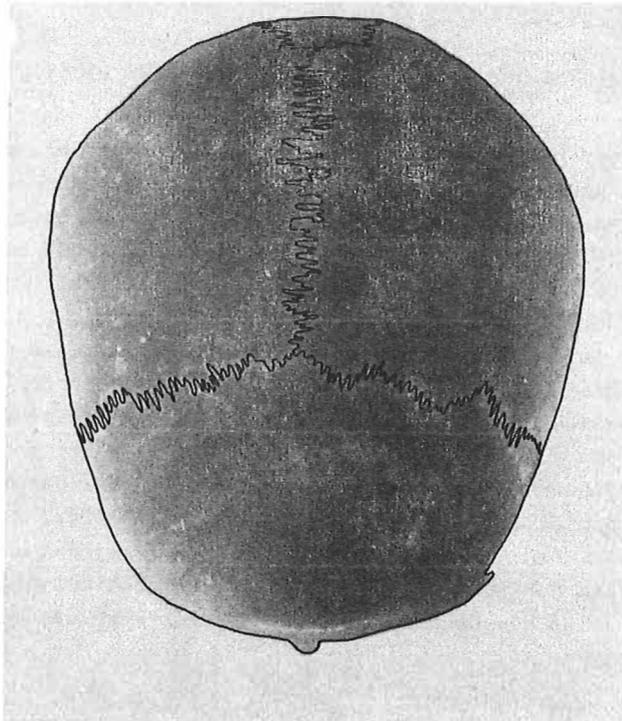


Abb. 9 c Vollständig ausgebildete Suture; aus JANSSEN & CREUTZ (1981)

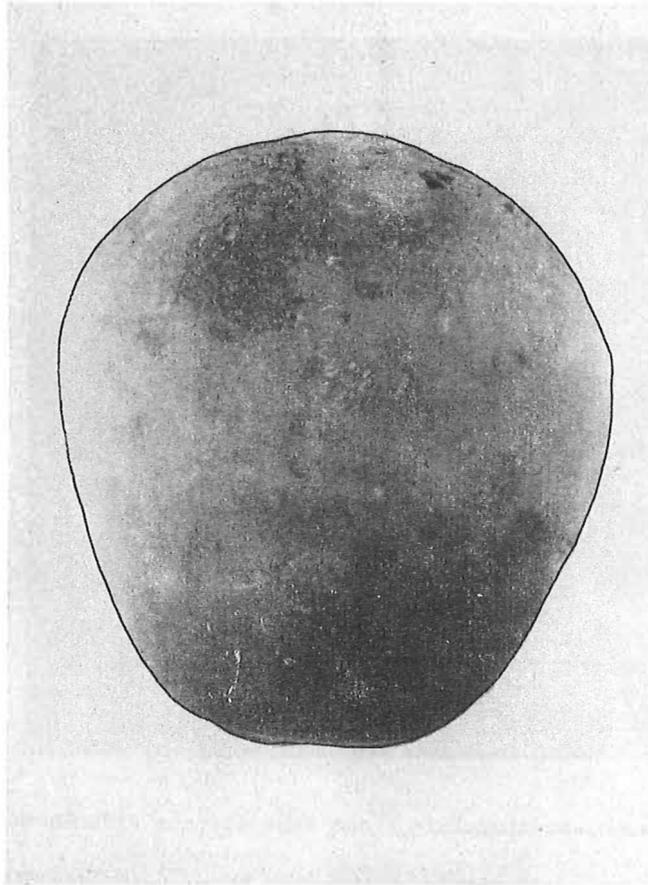


Abb. 9 d Verschwinden der Suture; aus JANSSEN & CREUTZ (1981)

Für die Problematik der Drucklösungsprozesse ergibt sich an der Calotte die Möglichkeit eines genauen Studiums der Spannungsverteilung im Bereich der Suture, d.h., das Problem der großflächigen Spannungsverteilung in der Natur kann an einem konkreten, überschaubaren Objekt analysiert werden. Darüber hinaus bietet das hier vorgestellte Modell der Spannungsverteilung in der Calotte eine plausible Erklärung für die unterschiedliche Ausbildung der Schädeluturen. So ist z.B. die *Sutura coronalis* (Kranznaht) im Bereich des Zusammentreffens mit der *Sutura sagittalis* (Pfeilnaht) weniger stark suturiert als in dem Bereich, wo Schläfen- und Scheitelbein aufeinandertreffen. Da die Calotte keine runde, sondern eine ovale bis eckige Form aufweist, kann es - bei Zugrundelegung des hier vorgestellten Modells - zu einer Spannungsüberlagerung im Randbereich der Calotte kommen und somit auch zu einer unterschiedlichen Ausbildung der Schädeluturen.

Daß die am menschlichen Schädeldach zu beobachtenden Wachstumsvorgänge mit dem entsprechenden Muster als Folge von Drucklösungen im Gestein vergleichbar sind, bestätigen auch weitere Feststellungen:

- a) Dünnschliffuntersuchungen an Calottenausschnitten aus der Pfeilnaht zeigen quer zur Pfeilnaht verlaufende Gewebestrukturen. Wir können also ähnlich wie bei Gesteinsdünnschliffen - nur ungleich deutlicher - eine Ausrichtung der Ultrastruktur (Gefüge) in Druckrichtung beobachten.
- b) Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop aus dem unmittelbaren Bereich der Schädelnaht zeigen analog zu den Drucksuturen in Karbonatgesteinen vollständig ausgebildete Kristalle (Abb. 10).
- c) Elementbestimmungen mit Hilfe röntgenanalytischer Untersuchungen im Randbereich der Naht, die an der Bergakademie Freiberg durchgeführt wurden, erbrachten im Vergleich zum umgebenden Knochen den Nachweis der erhöhten Anreicherung der Elemente Silicium und Eisen (Abb. 11).
Das bedeutet, daß sich ähnlich wie in den Styolithensäumen die unlöslichen Komponenten im Druckschatten anreichern.

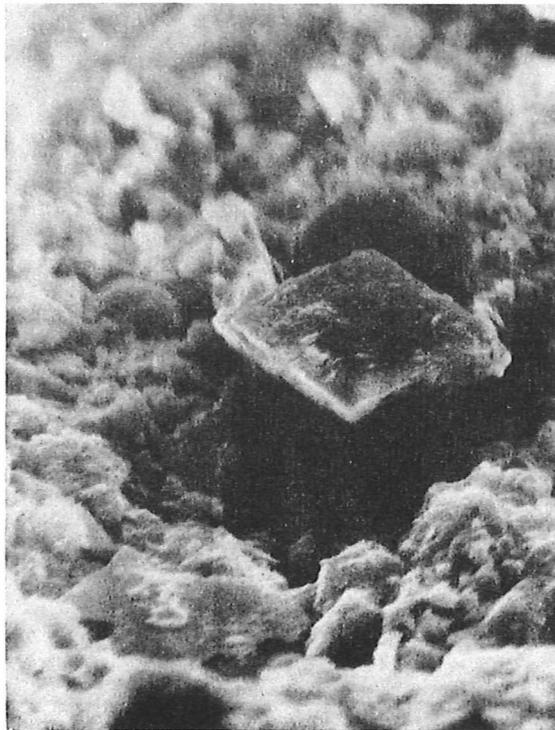


Abb. 10 Idiomorpher Kristall im Bereich der Schädelnaht - Elektronenoptische Aufnahme, 1800 : 1

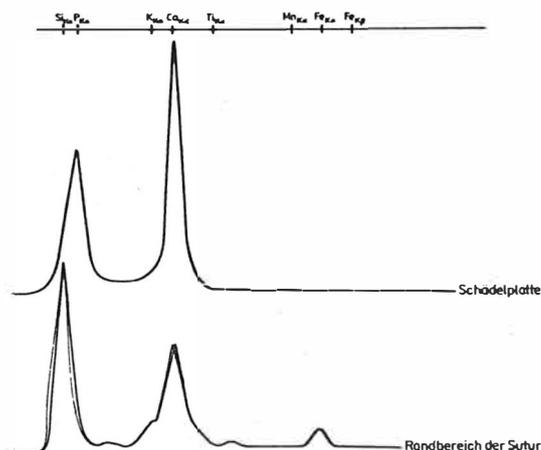


Abb. 11 Elementverteilung (Fe, Ti, Ca, K, P, Si) im Randbereich der Sutura und im Schädelknochen

Daraus ergibt sich, daß zwar zwischen beiden Prozessorvorgängen deutliche Unterschiede bestehen (Überlagerung von organischem und anorganischem Wachstum auf der einen, rein anorganisches Wachstum auf der anderen Seite), die unmittelbaren physikochemischen Ursachen der Sutura-genese aber trotzdem die gleichen sind. Die von TRURNIT (1967) aufgestellte Klassifikation der Drucklösungskontakte findet am Beispiel der Schädelsturen ihre eindrucksvolle Bestätigung.

2.2. Sigmoidalklüfte

2.2.1. Literaturanalyse

Im Gegensatz zu den Stylolithen ist die Frage der Entstehung der Sigmoidalklüfte bis heute umstritten. Nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über die unterschiedlichen Deutungen.

Tabelle 1: Übersicht zur Deutung der Sigmoidalklüftung (ausgewählte Autoren, ergänzt nach KRUCK 1974)

Autor	Bezeichnung	Deutung
FRANTZEN (1892)	schräge Zerklüftung	ablagerungsbedingte Diagonalstruktur, die durch Spannungen beim Verfestigungs- und Schrumpfungsvorgang entstand.
LOTZE (1932)	Querplattung	Klüfte, entstanden durch Schrumpfung, anschl. Bewegungen parallel der Schichtflächen vor der vollständigen Verfestigung (u.a. bei subaquatischen Rutschungen).
ENGELS (1956)	Querplattung	Tektonische Bewegungsstrukturen nach der Diagenese.

Autor	Bezeichnung	Deutung
WAGNER (1964)	Querplattung	Tektonische Bewegungsstrukturen, spätdiagenetische Entstehung, werden erstmals mit H.-Styloolithen in Verbindung gebracht.
FIEDLER (1965)	Querplattung	Stellt eine dem Deckgebirge gemäÙe Form der Schieferung (Bruchschieferung) dar.
BEIERSDORF (1969)	Längsplattung	Frühdiaenetische Scherstrukturen, bedingt durch Horizontalbewegungen.
SCHWARZ (1970)	Sigmoidalklüftung	Primärklüfte, entstanden durch Änderung des Porenwasserüberdruckes. In einer zweiten, vermutlich gleichzeitig einsetzenden Bildungsphase kam es zur Verbiegung der Segmente infolge Auflast während der Setzung.
BRÜCK (1974)	Querplattung	Frühdiaenetische Kluft, aus den Verstellungen und Verformungen der Querplattung wird auf eine nachfolgende Bewegung im Liegenden geschlossen. Als Ursache dafür werden gerichtete Krustenbewegungen angesehen.
KÜRZE (1981)	Querplattung	Als Ursache der großräumig-gleichinnigen Querplattung werden vor allem Kräfte angesehen, die aus Erdrotation und eventuell von Gezeiten herrühren. Eine besondere Bedeutung wird der Corioliskraft zugemessen.

2.2.2. Begriffserklärung

Generell werden unter Sigmoidalflächen (Sigmoidalklüften) s-förmig gebogene Schichtflächen bzw. Klüfte verstanden. Im Muschelkalk sind besonders "Einzelne dünne Mergelkalkbänke des Wellenkalkes durch schräg oder s- oder zickzackförmige durch sie hindurchsetzende feine Klüftung in parallele, manchmal ebene, meist aber wellig verbogene oder geknickte, im Durchschnitt gegen 1 cm breite Platten schief zur Bankung aufgeteilt" (Abb. 12, LÖTZE 1932).



Abb. 12 Sigmoidalklüfte im Aufschluß Rüdersdorf (Bereich der Kreuzbrückenspalte)

2.2.3. Sigmoidalklüftung als tektonische Indikation

Obwohl viele Autoren (BEIERSDORF 1969, KRUCK u.a. 1974) die Sigmoidalklüftung als Arbeitsmittel in der Tektonik nutzten, zeigt die tabellarische Übersicht, daß ihre tektonische Anwendung nur mit Vorbehalt möglich ist, da ihre Richtungskonstanz nach der begründeten Auffassung einiger Autoren (SCHMITT 1935, SCHWARZ 1970) nicht unbedingt tektonischen Ursprungs sein muß. Als tektonische Indikation ist sie Ausdruck einer Horizontalbewegung.

2.2.4. Zeitliche Anlage der Sigmoidalklüftung

Nach der Auffassung fast aller Autoren scheint die Annahme einer frühdiagenetischen Anlage gesichert zu sein. Auch die Meinung von LOTZE (1932), daß bei der Bildung der Sigmoidalklüfte zwei Phasen ausgehalten werden müssen, wird von vielen Bearbeitern geteilt. Weiterhin zeigen alle Beobachtungen, daß die Sigmoidalklüftung in der Regel an bestimmte stratigraphische und regionale Niveaus gebunden ist und besonders vom lithologischen Aufbau der Sedimente bestimmt wird (vgl. Abschn. 5.1.).

2.3. Rupturen

Als Ruptur wird jede durch tektonische Vorgänge im Gestein erzeugte Trennfläche bezeichnet. Sie bildet somit den Oberbegriff für Klüfte, Spalten und Störungen aller Art. Die Untersuchung des reupturellen Gefüges war nicht Gegenstand dieser Arbeit. Dennoch wurden zur besseren relativzeitlichen und genetischen Einordnung der H.-Styrolithen in die tektonische Entwicklung des Tafeldeckgebirges in ausgewählten Aufschlüssen, besonders in den saxonischen Störungszonen, erweiterte kleintektonische Untersuchungen durchgeführt. Nachfolgende Darstellung beschränkt sich auf eine kurze Übersicht.

Klüftung

Als Klüftung wird jede Art von Fugenbildung im Gestein bezeichnet, solange sich an ihnen keine meßbare seitliche Verschiebung vollzog, wobei selbst Flächen mit sehr geringen Bewegungen noch zu den Klüften gerechnet werden (CLOOS 1936). Nach dem gleichen Autor sind die Klüfte eine universelle Erscheinung, die sich bildeten, seitdem es eine feste Erdkruste gibt.

Im allgemeinen treten Klüfte in großer Anzahl auf. Genetisch werden Quer-, Längs- und Diagonalklüfte ausgehalten. Querklüfte oder auch Zugklüfte entstehen senkrecht zur größten Dehnung (Querdehnungsklüfte im Sinne von BANKWITZ 1966), d.h., sie verlaufen querschlägig zur Formungsachse (z.B. zur Faltenachse). Gefügekundlich entsprechen sie den ac -Flächen.

Parallel zur tektonischen Achsenrichtung streichende Klüftsysteme werden als Längsklüfte bezeichnet (bc -Flächen).

Bei den Diagonalklüften handelt es sich nach CLOOS ausschließlich um Scherklüfte. Sie bilden zweisecharige Scherflächenpaare, deren beiden Scharen im rechten Winkel zueinander stehen.

Grundlegend neue Erkenntnisse zur Klüftbildung und -ausbreitung sowie zur tektonischen Interpretation der Klüfte wurden in den umfangreichen Arbeiten von BANKWITZ (1965, 1966, 1978, 1978, 1980 und 1984) sowie von BOCK (1972, 1976 und 1980) beschrieben. Besonders BANKWITZ hat mit der Anwendung neuerer Erkenntnisse der modernen Festkörperphysik we-

sentliche Fortschritte bei der Interpretation der Klüfte erzielt. Durch den Nachweis und die Untersuchung der Kluftoberflächenstrukturen konnten Aussagen zur Aufreißrichtung, -geschwindigkeit und zur Altersbeziehung benachbarter Klüfte gewonnen werden. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, daß viele Kluftflächen eine Symmetrie aufweisen, die auf den dreidimensionalen Bruchablauf zurückgehen (BANKWITZ 1984). Aus dieser Symmetrie ist es bei günstigen Aufschlußbedingungen möglich, auf die Position der regionalen Hauptspannungsachsen zu schließen (BANKWITZ 1984). Wesentliche Hinweise auf die Orientierung des Paläospannungsfeldes ergeben sich aus der Ausgestaltung und Anordnung der Kluftränder.

BOCK (1980) wies nach, daß sich Kluftgefüge in tektonisch nicht beanspruchten Sedimentgesteinen (primäres oder fundamentales Kluftsystem) wesentlich von den Kluftgefügen in Gebieten mit rupturer Deformation unterscheiden. Während im ersten Fall die maximale Hauptnormalspannung (σ_1) durch die Auflast der Schichten entstand und somit immer senkrecht zum Schichteinfallen orientiert ist, wird σ_1 im zweiten Fall durch die tektonische Deformation bestimmt.

Störungen

Als Störung wird eine Trennfuge im Gebirge bezeichnet, an der eine Verstellung der beiden angrenzenden Schollen stattgefunden hat. Ähnlich wie bei den Klüften kann aus den Störungsflächen auf die Position der regionalen Hauptspannungsachsen geschlossen werden. BANKWITZ (1982) wendete eine Interpretationsmethode an, die auf der Aufnahme von folgendem tektonischen Inventar basiert: Störungsfläche, Harnischrillung, Hilfsfläche senkrecht zur Rillung, Bewegungsrichtung der Hangendscholle und Fläche senkrecht zur Störungsfläche durch die Rillung. Aus diesen Indikationen ist eine Spannungsanalyse möglich, wobei nach der Methode von ARTHAUD (1969) die Pole der Störungsfläche und der Harnischrillung in einem Diagramm eingetragen werden. Der Schnittpunkt der zwei Großkreise dieser Bewegungsflächen stellt eine der Hauptachsen der Deformation dar (BANKWITZ 1982). Die Methode von ARTHAUD wurde später von CAREX & BRUNIER (1974, zit. aus BANKWITZ 1982) und CAREY (1979, zit. aus BANKWITZ 1982) weiterentwickelt.

2.4. Petrophysikalische Untersuchungen

Die petrophysikalischen Untersuchungen verfolgen das Ziel, die im Hinblick auf eine Spannungsanalyse nicht immer eindeutigen geologisch-tektonischen Ergebnisse zu ergänzen und zu modifizieren. Die angewendeten Verfahren sind indirekte Methoden, die von der Voraussetzung ausgehen, daß die als Wirkung der tektonischen Beanspruchung, nach einer bevorzugten Symmetrie angeordneten anisotropen Mineralien eine Gesteinsanisotropie verursachen, die sich mit physikalischen Untersuchungsmethoden nachweisen läßt (VOWINKEL 1978).

Eine verbesserte Gerätetechnik führte in den letzten Jahren zu einem großen Aufschwung der physikalischen Methoden zur Bestimmung der Gesteinsanisotropie. An dieser Stelle sei auf einige wichtige Arbeiten verwiesen, u.a.: BRINKMANN u.a. (1961); GIESEL (1962); HURTIG (1968); PLESSMANN & SPAETH (1972); VOWINKEL (1978).

In dieser Arbeit werden zur Bestimmung der Gesteinsanisotropie Ultraschallgeschwindigkeitsmessungen durchgeführt. Zusätzlich wurde mit Hilfe der Röntgentexturanalyse

die Regelung von Netzebenen bestimmter Mineralien ermittelt. Damit soll eine Aussage getroffen werden, ob und in welcher Größenordnung die Mineralanisotropie einen ursächlichen Faktor für die Gesteinsanisotropie darstellt (VOWINKEL 1978). Im Gegensatz zu den physikalischen Untersuchungsmethoden erfolgt bei der Röntgentexturanalyse ein direkter Nachweis der Einregelung der Minerale.

2.4.1. Probennahme

Für die physikalischen und gefügekundlichen Untersuchungen wurden Proben aus folgenden stratigraphischen Horizonten entnommen (Tab. 2).

Tabelle 2: Übersicht über Formation und Anzahl der untersuchten Proben

<u>Formation</u>	<u>Anzahl der Proben</u>
Zechstein (P_2)	17
Malm (J_3)	1
Muschelkalk ($T_{2.1}$, $T_{2.3}$)	168
Oberkreide (K_2)	<u>17</u>
	203

Regional konzentrierte sich die Beprobung auf folgende Gebiete: Rüdersdorf ($T_{2.1}$); Subherzyne Senke (P_2 , J_3 , $T_{2.1}$, K_2); Thüringische Senke ($T_{2.1}$, $T_{2.3}$); Südthüringisch-Fränkische Scholle (P_2 , $T_{2.1}$).

Die Entnahme erfolgte nach folgenden Gesichtspunkten:

1. Sämtliche Proben wurden orientiert entnommen.
2. Die Probengröße wurde so bemessen, daß die Anfertigung mehrerer Meßkörper aus einer Probe ermöglicht wurde und daß aus einem Handstück für alle vorgesehenen Untersuchungsverfahren Präparate orientiert hergestellt werden konnten.
3. Als Probenhorizonte wurden dünnbankige Zonen ausgewählt (3 - 8 cm), da feinschichtige Bereiche nicht die Herstellung der notwendigen Probenkörper erlaubten und dickbankige Zonen den Aufwand der Probenvorbereitung wesentlich erhöhten.
4. Nach Möglichkeit wurden die Proben aus den Horizonten entnommen, in denen auch H.-Styolithen auftreten.
5. Bei der Auswahl der Probe wurde darauf geachtet, daß das Probenmaterial möglichst homogen war, da Inhomogenitäten (Klüfte, mineralisierte Klüfte, Risse, Hohlräume usw.) die Untersuchungsergebnisse entscheidend verfälschen können.
6. Bei der Entnahme der Probe wurde darauf geachtet, daß das Gefüge möglichst ungestört blieb.

2.5.2. Probenvorbereitung

Aus den entnommenen Proben wurden achtseitige Prismen (Abb. 13) für Ultraschallmessungen angefertigt.

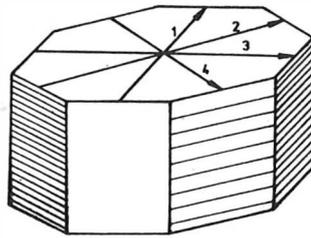


Abb. 13 Probenkörper mit Meßrichtung

Ausgehend von Nord wurde alle 45° eine Prismenfläche geschnitten. Dabei ist auf eine senkrechte Lage der Schnittfläche zur Schichtung geachtet worden. Die Einhaltung der Parallelität der sich gegenüberliegenden Flächen war besonders wichtig, da sonst eine genaue Längsmessung des Wellenweges nicht möglich gewesen wäre. Außerdem hätten sich daraus auch Ankopplungsprobleme bei der Laufzeitmessung ergeben (GEBHARDT 1981). Da die Untersuchungsergebnisse von VOWINKEL (1978) belegen, daß Geschwindigkeitsunterschiede und somit auch die Anisotropien bei getrockneten Proben am deutlichsten sichtbar werden, erfolgte vor der Messung eine mehrstündige Trocknung der Proben bei 100°C im Autoklaven. Gleichfalls aus den achteckigen Prismen erfolgte die Herstellung der Probenkörper für die Röntgentexturanalyse. Die Proben mit einer Abmessung von $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ wurden jeweils parallel und senkrecht zur Schichtung geschnitten.

2.4.3. Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeiten elastischer Wellen

Die Durchschallung von Gesteinsproben mittels elastischer Wellen in verschiedenen Richtungen und die Ermittlung der jeweiligen Geschwindigkeit der Longitudinalwelle ist die zur Zeit gebräuchlichste Methode des Anisotropienachweises. Im Mittelpunkt der Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elastischen Wellen steht die Frage, inwieweit die tektonische Spannung, die die Ausbildung der H.-Stylolithen bedingte, auch eine Anisotropie der elastischen Eigenschaften in den untersuchten Kalksteinen hinterließ. Die im Gestein vermutete Gefügeregelung als Ergebnis der tektonischen Spannung soll indirekt durch die Geschwindigkeitsanisotropie bestätigt werden.

2.4.3.1. Der Prozeß der Anisotropisierung

Das Gestein wird als anisotrop bezeichnet, wenn bestimmte vektorielle petrophysikalische Parameter hinsichtlich ihres Betrages eine nachweisbare Richtungsabhängigkeit besitzen. Die Anisotropien werden nach GEBHARDT (1981) unterteilt:

1. Nach der Ausbildungsform in Schichtungs-, Schieferungs- und Klüftungsanisotropie.

2. Nach den richtungsabhängigen petrophysikalischen Parametern (z.B. Elastizitätsanisotropie, Suszeptibilitätsanisotropie, Wärmeleitfähigkeitsanisotropie).
3. Auf der Grundlage der Symmetrie der Anisotropien in:
 - hexagonale Symmetrie (Schichtungsanisotropie),
 - rhombische Symmetrie; hier kommt eine Richtungsabhängigkeit parallel zur Schichtung hinzu. Die drei Symmetrieachsen stehen senkrecht aufeinander und haben alle unterschiedliche Länge. Diese Symmetrie entsteht hauptsächlich durch tektonische Einflüsse.
 - monokline und triklone Anisotropie.

Nach HURTIG (1968) lassen sich die Prozesse, die zu einer Anisotropisierung des Gesteins führen, in mehrere Gruppen einteilen, wobei sowohl sedimentäre als auch kristalline Gesteine Berücksichtigung finden. Als eine Möglichkeit wird von HURTIG die Verfestigung hochporöser und wassergesättigter Gesteine bei Volumenverminderung durch Abfuhr einer flüssigen oder leichtflüssigen Komponente angesehen. Charakterisiert wird dieser Vorgang durch die Einregelung plattiger Körner unter hydrostatischem Druck und Auspressung des Porenwassers während der Diagenese. Es entsteht die Schichtungsanisotropie.

Seitlicher Druck kann ebenfalls eine Anisotropisierung des Gesteins bewirken, die gleichfalls durch die Einregelung des Korngefüges bedingt ist.

GIESEL (1962) wies an tektonisch verformten Sandsteinen nach, daß eine Einregelung der Kornlängsachse senkrecht zum größten Druck erfolgte. Anisotropieuntersuchungen (Ultraschallmessungen) zeigten, daß die größte Longitudinalwellengeschwindigkeit gleichfalls in Kornlängsachsenrichtung vorlag. Sind die meisten Minerale mit ihrer Längsachse in einer bestimmten Richtung geregelt, so sind in dieser Richtung die wenigsten Kontakte pro Längseinheit vorhanden, welche die Schallwellen beim Durchlauf behindern (VOWINKEL 1978).

Kalzitkristalle in Karbonatgesteinen werden senkrecht zur Beanspruchungsrichtung eingeregelt, d.h., die c-Achse ist überwiegend in Druckrichtung orientiert (BRINKMANN u.a. 1961). Die a-Achse und somit auch die maximale Geschwindigkeit der Schallwellen ist also immer senkrecht zur Druckrichtung, in unserem Fall der größten Hauptnormalspannung orientiert.

VOWINKEL (1978) stellte bei Untersuchungen an Tonschiefern der Ardennen fest, daß außer der Einregelung der Körner durch die Schieferung noch eine bevorzugte Ausrichtung der Kornlängsachsen innerhalb der Schieferungsebenen besteht. Durch entsprechende Meßverfahren (Ultraschallmessungen, Wärmeleitfähigkeitsmessungen u.a. wies VOWINKEL den Zusammenhang zwischen Ausrichtung der Körner und den bestehenden Anisotropien nach.

Die primäre Anisotropisierung spielt nach GIESEL (1962) nur eine untergeordnete Rolle. Er wies nach, daß selbst bei Sandsteinen, die in der Strömung eingeregelt waren, die Anisotropieachsen immer der Druckspannungsrichtung folgten und nicht der Strömungsrichtung.

2.4.3.2. Theoretische und experimentelle Grundlagen der Ultraschallmessungen

Ultraschallmessungen an Mineralen zeigen in den verschiedenen kristallographischen Richtungen unterschiedliche Geschwindigkeiten (Tab. 3).

Tabelle 3: Ultraschallgeschwindigkeiten in Mineralien bei Raumtemperatur und Normaldruck (WILLIE u.a. 1956, DORING 1972, zit. aus VOWINKEL 1978)

Mineral	Geschwindigkeit in der kristallographischen Richtung (m/sec)		
	X	Y	Z
Feldspat $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6 SiO_2$	3700	5720	3790
Feldspat $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6 SiO_2$	4300	6680	-
Kalzit $CaCO_3$	7040	6560	4800
Muskovit	6550	-	-
Quarz	5380	5410	6520

Wird das Mineral einer einseitigen mechanischen Belastung ausgesetzt, ohne daß Bruch oder Spaltung eintritt, so kommt es - vereinfacht gesagt - zur plastischen Verformung, verbunden mit einer homogenen Gitterdeformation unterscheidbar als Translation und Gittergleitung (KLOCKMANN 1978). Die plastische Deformation bewirkt eine Regelung der Minerale im Gestein, die wiederum die Laufzeit der Schallwellen dahingehend bestimmt, daß sich Maxima und Minima in den vorgegebenen Regelungsrichtungen widerspiegeln. Neben der plastischen Deformation durch einseitige mechanische Belastung können auch irreversible - rupturale oder fließende - Verformungen dann auftreten, wenn Gesteine der Erdkruste über geologisch lange Zeit elastisch gespannt bleiben (GIESEL 1962). Die durch tektonische Einflüsse hervorgerufenen Veränderungen im Sedimentgestein (Ausrichtung der Körner, Kompression des Porenraumes, Veränderung der Kornkontakte usw.) bewirken die Herausbildung neuer Elastizitätseigenschaften, die dem Sediment zusätzlich zur meist schon vorhandenen Schichtungsanisotropie eine weitere Richtungsabhängigkeit der Longitudinalwellengeschwindigkeit, im Idealfall in schichtparalleler Richtung aufprägen. Aus einer hexageonalen Anisotropie wird dann im einfachsten Fall ein rhombische Anisotropie, wobei davon ausgegangen werden kann, daß die tatsächlichen Elastizitätsverhältnisse noch wesentlich komplizierter sind (HURTIG 1968). Bislang wurde für Anisotropieuntersuchungen immer die Geschwindigkeit der Longitudinalwelle genutzt, da der Nachweis der Transversalwellengeschwindigkeit wesentlich schwieriger ist. Die Longitudinalwellengeschwindigkeit ergibt sich aus der Laufzeit der p-Welle durch die Gesteinsprobe (t_p) und dem zurückgelegten Weg (s) durch die Beziehung:

$$(3) \quad v_p = \frac{s}{t_p}$$

Eine Anisotropie der elastischen Eigenschaften äußert sich dann in einer Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den verschiedenen Richtungen. Die bisherigen Untersuchungen zur Anisotropie wurden überwiegend an Sand- und Tonsteinen durchgeführt. Da der Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit aber karbonatisches Gestein ist, das bekanntlich hinsichtlich plastischer und elastischer Deformation und den damit verbundenen Anisotropieverhalten anders reagiert, machten sich petrophysikalische Untersuchungen unter hohen Drücken als Grundlage für die physikalischen Messungen erforderlich.

Ziel der Versuche ist es, zu zeigen, inwieweit unterschiedliche einaxiale und hydrostatische Drücke das Anisotropieverhalten des Probenkörpers beeinflussen. Die Versuche mit der einaxialen Presse zeigen keine eindeutigen Ergebnisse. Die Geschwindigkeitserniedrigung, die nach der einseitigen Belastung bei einem Teil der Proben beobachtet wurde, bewegt sich in der Mehrzahl innerhalb der Fehlergrenze. Auch eine Erhöhung der Belastung und eine Verlängerung der Belastungszeit führt zu keiner grundlegenden Änderung der eingangs gemessenen Geschwindigkeit (Tab. 4).

Tabelle 4: Schallwellengeschwindigkeit in Abhängigkeit von Zeit und Druck

Geschwindigkeit:

vor der Belastung (m/s)	nach 10 Stunden (100 Bar)	nach 20 Stunden (100 Bar) (200 Bar)	nach 30 Stunden (100 Bar)
359	357	-	356
365	361	361	-
440	438	438	-
457	454	454	-
451	450	-	451

Aufgrund dieser Ergebnisse wurden die Untersuchungen mit der einaxialen Presse nicht weitergeführt. Hingegen sind die Versuchsergebnisse mit der 3 Kb Druckkammer für die Interpretation der Schallwellengeschwindigkeiten von Bedeutung. Berücksichtigt werden muß dabei aber die geringe Anzahl der Messungen. Im Versuch erfolgten die Messungen der Schallgeschwindigkeiten nacheinander in N-S und E-W Richtung vor, während und nach der Belastung. Gleichzeitige Messungen sowohl in N-S als auch in E-W Richtung sind nicht möglich. Unter Berücksichtigung der aufgeführten Vorbehalte lassen sich aus dem Versuch folgende Ergebnisse ableiten (Abb. 14):

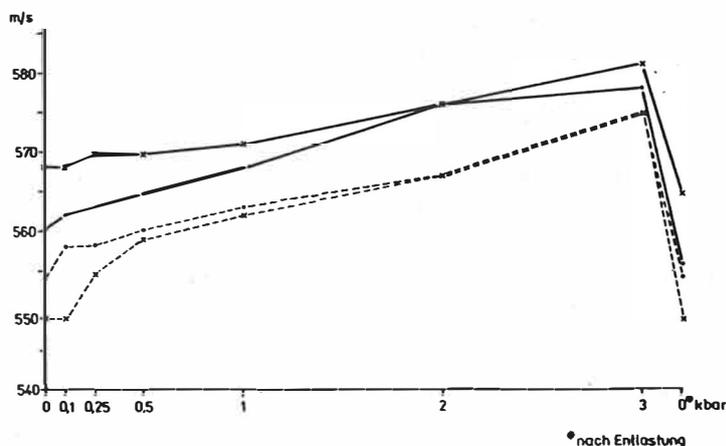


Abb. 14 Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit vom hydrostatischen Druck

1. Die Geschwindigkeitsanisotropie ist bis zu Drücken von 2 Kb wirksam, bei Drücken > 2 Kb verlieren sich die Geschwindigkeitsunterschiede.

2. Der Geschwindigkeitsanstieg ist durch einen steilen nicht linearen Anstieg im niederen und einen flachen linearen Anstieg im höheren Druckbereich gekennzeichnet. Einen ähnlichen Kurvenverlauf zeigen die Untersuchungen von FREUND (1981), der Proben aus dem sedimentären Rotliegenden untersuchte. FREUND wies nach, daß die Änderung der Schallgeschwindigkeiten eindeutig zu Lasten der Verschließung der Mikrorisse geht, und daß der volumenmäßig weitaus erheblichere Anteil der Poren für das Verhalten der Schallgeschwindigkeiten unter hydrostatischem Druck eine untergeordnete Rolle spielt.
3. Die in den Proben vorhandene Anisotropie zeigt sich nach der Entlastung verstärkt oder bleibt zumindest in der Größenordnung vorhanden. Eine Verstärkung würde für deformative Änderungen im Gitterbau der Kristalle sprechen. Aufgrund ihrer innerelastischen Verformungsanteile treten irreversible Unterschiede zwischen der Be- und Entlastung auf (MILITZER u.a. 1978).
4. Bei der Verstärkung der Anisotropie nach der Entlastung könnte auch unter Umständen die mögliche Umwandlung von Kalzit zur Aragonit eine Rolle spielen. Ab 3 Kb wird Aragonit stabil.
5. Die gemessenen Geschwindigkeiten sind nach der Entlastung in beiden Richtungen geringer als bei der Nullmessung.

Insgesamt zeigen die Untersuchungsergebnisse mit der 3 Kb-Druckkammer, daß die gemessenen Anisotropien sehr wahrscheinlich auf eine Regelung des Gefüges zurückzuführen sind, da die Schließung der Mikrorisse (Cracks) zwar zur Änderung der Schallgeschwindigkeit führt, aber die Geschwindigkeitsanisotropien bis zu 2 Kb erhalten bleiben.

2.4.3.3. Methodik und Versuchsdurchführung der Ultraschallmessungen

Im Hinblick auf eine Paläospannungsanalyse sind besonders Messungen in schichtparalleler Richtung interessant. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen ist von den bestehenden elastischen Verhältnissen und von der Dichte abhängig.

Nach MILITZER u.a. (1978) gilt für ein homogenes isotropes Medium:

$$(4) \quad v_p = \frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \text{Longitudinalwelle}$$

$$(5) \quad v_s = \frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)} \quad \text{Transversalwelle}$$

E = Elastizitätsmodul

ν = Poissonzahl

Im Rahmen dieser Arbeit wurden nur die Geschwindigkeiten der Longitudinalwellen gemessen, da bei der Verwendung herkömmlicher P-Wellenanreger der Einsatz der S-Welle nicht exakt bestimmbar war.

Die Messungen wurden im VEB Geophysik Leipzig und im Bereich Hochdruckphysik des Zentralinstituts für Physik der Erde durchgeführt. Dabei fanden ein herkömmliches Ultraschallmeßgerät in Verbindung mit einem digitalen Zählgerät sowie eine spezielle

Anpreßvorrichtung für die Wandler (Sende- und Empfangskopf) Verwendung (vgl. GEBHARDT 1981). Die Anpreßvorrichtung ist mit einem Meßschieber kombiniert, wodurch die Bestimmung des Wellenlaufweges ermöglicht wird. Ein weiterer Vorteil der Anpreßvorrichtung besteht darin, daß die Wandler mit einem definierten Anpreßdruck an die Meßkörper angeschlossen werden. Somit ergaben sich für alle Proben gleiche Bedingungen. Abbildung 15 zeigt eine Prinzipdarstellung der Ultraschallmeßapparatur.

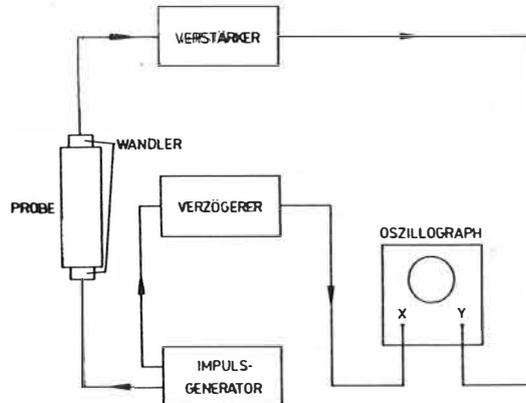


Abb. 15 Prinzip der Ultraschallmessung

Vom Generator werden kurze elektrische Impulse erzeugt, die vom Sendekopf in hochfrequente mechanische Schwingungen umgewandelt werden. Diese durchqueren die Probe als Longitudinalwelle in der Zeit t_p . Anschließend erfolgt im Empfangskopf die Rückumwandlung in elektrische Schwingungen. Die Schwingungen durchlaufen einen Verstärker und gelangen mit Hilfe eines Oszillographen zur Anzeige. Die Laufzeit der Welle ergibt sich aus der Phasenverschiebung des Schwingungsbildes. Gemessen wurde mit der Frequenz von 1 MHz und einer Anpreßkraft von 500 N. Feinmechanikerfett diente als akustisches Ankopplungsmittel.

Die Laufzeit der Welle durch das Umhüllungsmaterial der Wandler wird vor dem eigentlichen Meßvorgang bestimmt und geht als Verzögerungszeit in die Berechnung der Anisotropie mit ein. Die Untersuchungen erfolgten ausgehend von der Nordrichtung im Uhrzeigersinn zwischen allen sich gegenüberliegenden Seitenflächen des Untersuchungskörpers. Pro Probe erfolgten 8 schichtparallele Messungen, wobei in jeder Richtung zweimal gemessen wurde. Die Ablesegenauigkeit bei der Laufzeit beträgt 0,05 s, die des Meßschiebers 1/10 mm. Unter Berücksichtigung der zu erwartenden geringen Anisotropien der Muschelkalkproben erfolgte die Auswertung in folgenden Arbeitsschritten (vgl. GEBHARDT 1981):

1. Ermittlung der wahren P-Wellenlaufzeit (t_p) durch die Gesteinsprobe, indem von allen gemessenen Laufzeiten (t_g) die Verzögerungszeit (t_v) subtrahiert wurde.

$$(6) \quad t_p = t_g - t_v$$

2. Nach der Beziehung (6) wurde die Longitudinalwellengeschwindigkeit für jede Laufzeit bestimmt.

3. Aus jeweils zwei zueinander inversen Meßrichtungen ergaben sich durch arithmetische Mittelung für jeden Probenkörper 4 schichtparallele Geschwindigkeiten, die die Richtungen N-S, NE-SW, E-W und SE-NW repräsentieren.

4. Ermittlung des Anisotropieverhältnisses K aus

$$(7) \quad K = \frac{V_{p_{\max}}}{V_{p_{\min}}}$$

5. Statistische Erfassung der Minimalgeschwindigkeiten jeder Probe. Anschließend erfolgte die Bestimmung des prozentualen Anteils der Mindestgeschwindigkeiten für den untersuchten Aufschlußbereich, verbunden mit einer graphischen Darstellung (Richtungsrose).

2.4.4. Röntgentexturanalyse

Ziel der Röntgentexturanalyse war es, zu zeigen, ob die Anisotropien der elastischen Wellengeschwindigkeiten tatsächlich auf einer Gefügeregelung beruhen. Die Möglichkeit, Gefügeregelungen mit Hilfe von röntgenographischen Untersuchungen nachzuweisen, wurde 1930 von SANDER und SACHS entwickelt (VOWINKEL 1978). Mit der Verbesserung der Röntgenapparatur hat diese Methode eine weite Verbreitung in der Gefügekunde gefunden. Bislang wurden vor allem Erze, Quarze, Glimmer und Tonminerale untersucht, z.B. PLESSMANN & SPAETH (1972) und VOWINKEL (1978). Messungen von KERN (1974) an Marmorproben zeigten eine ausgezeichnete Korrelation von Gefügeregelung und seismischer Anisotropie. Untersuchungen an Karbonatgesteinen aus dem Muschelkalk wurden - soweit dem Verfasser bekannt - noch nicht durchgeführt.

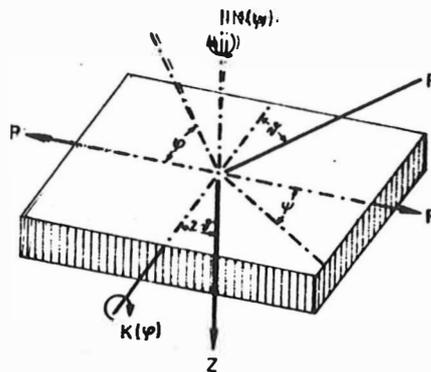
Die Auswahl der orientierten Proben erfolgte unter Berücksichtigung nachstehender Gesichtspunkte:

1. An sämtlichen Proben wurden vorher Ultraschallmessungen durchgeführt.
2. Das Probenmaterial sollte möglichst homogen und feinkörnig sein.

2.4.4.1. Grundlage der Röntgentexturanalyse

Bei der Texturaufnahme wird die Einregelung einer Gitterebene eines bestimmten Minerals gemessen (VOWINKEL). Dabei wird mit einer festen Strahlengeometrie gearbeitet. Die Probe dreht sich um zwei senkrecht aufeinander stehende Achsen und führt dabei Pendelbewegungen aus (Abb. 16).

Durch die Drehung mit gleichzeitiger Kippung erfolgt eine spiralförmige Abtastung, wobei der auftretende Röntgenstrahl nur dann zur Interferenz und Reflexion kommt, wenn die Normale der Netzebene des Minerals den Winkel zwischen dem auftreffenden und reflektierten Strahl halbiert und diese Mittellinie in der Reflexionsebene liegt (VOWINKEL). Durch ein Zählrohr wird der reflektierte Strahl aufgefangen und über einen Meßschrank auf ein Streifendiagramm ausgegeben. Die Höhe der Intensität, ausgedrückt in unterschiedlich starke Peaks, ist ein Maß für die Anzahl der in Reflexionsstellung liegenden Kristalle (Abb. 17).



N Drehachse	Z Zählrohr
K Kippachse	ψ Drehwinkel
P Probenpendelung	φ Kippwinkel
R Röntgenstrahl	θ Beugungswinkel

Abb. 16 Schematische Darstellung der Röntgentexturaufnahme (nach von GEHLEN 1960, zit. aus VOWINKEL 1978)

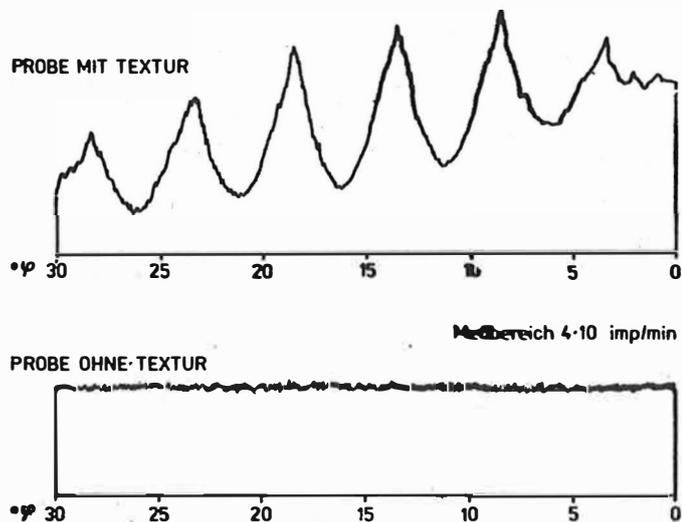


Abb. 17 Kompensographenaufzeichnung (nach VOWINKEL 1978)

Die Auswertung der Streifendiagramme erfolgt durch eine flächentreue Poldichteverteilung.

2.4.4. Aufnahme-Methodik und Durchführung der Messungen

Die Röntgentexturuntersuchungen erfolgten mit einem HZG 3 und einem in Eigenbau entstandenen Texturgoniometer an der Bergakademie Freiberg, Sektion Metallurgie und Werkstoffkunde.

Untersuchtes Mineral: Kalzit; Reflex 104
 Strahlung: Co K; 40 KC, 12 mA
 Meßbereich: 180 000 imp/min

Zuerst wurden mehrere Übersichtsaufnahmen mit dem Ziel durchgeführt:

1. Bestimmung des Reflexes mit der maximalen Intensität, wobei der Reflex nicht durch einen anderen überlagert oder gestört werden darf.
2. Überprüfung der erwarteten Hauptgemengteile durch die d-Werte mit Hilfe der ASTM-Kartei.

Die Texturmessungen erfolgten bis zu einem Kippwinkel von 60° ; größer 60° ist eine genaue Auswertung der Registrierkurven nicht mehr möglich. Nach Abschluß der Messungen wird eine Registrierkurve durch eine Gerade in willkürlich gewählte Abstände unterteilt. Die Schnittpunkte der Geraden mit der Kurve werden mit Hilfe einer Schablone, die eine Einteilung der Winkel γ (Drehwinkel) und φ (Kippwinkel) enthält, abgelesen und auf eine Auswertespirale, die dem Schmidtschen Netz entspricht, übertragen. Anschließend werden die zu den jeweiligen Intensitätsniveaus zugehörigen Punkte verbunden. Die Dichte der Isolinien ist ein Maß für die Straffheit der Regelung, d.h., sie läßt erkennen, ob viel oder weniger viel Kristalle des untersuchten Minerals (Kalcit) in Reflexionsstellung liegen (VOWINKEL).

Bei der Auswertung macht man sich die Tatsache zu Nutzen, daß sich aus dem Verlauf der Isolinien Aussagen über die Richtung der Einregelung ableiten lassen. Ergeben die Isolinien eine kreisförmige Anordnung, so geht man von einer flächenhaften Einregelung, welche der Verformung einer Kugel zum Rotationsellipsoid entspricht, aus (BREDDIN 1964). Eine ellipsenförmige Anordnung der Isolinien zeigt, daß die untersuchten Mineralien mit der Basis nicht so straff in die Aufnahme fläche geregelt sind. In Richtung der längsten Ellipsenachse liegt eine geringere Intensität der reflektierten Strahlung als in Richtung der kürzeren vor, d.h., die Mehrzahl der Mineralgitterebenen ist in Richtung der kürzeren Ellipsenachse eingeregelt.

3. Paläospannungsverteilung in den Untersuchungsgebieten

Ziel der nachfolgenden Ausführungen ist die regionale Beschreibung der Paläospannungsverteilung einiger Untersuchungsgebiete des Tafeldeckgebirges der DDR auf der Grundlage der in den bisherigen Abschnitten geschilderten Methoden. Verbunden mit der regionalen Beschreibung ist eine erste Interpretation für die jeweiligen lokalen Struktureinheiten.

Die tektonischen Untersuchungen im Aufschlußbereich erfolgten in Abstimmung mit Dr. FRANZKE aus Ilmenau. Insgesamt wurden von beiden Bearbeitern 167 Aufschlüsse des Tafeldeckgebirges aufgenommen. Die genaue Position der Aufschlüsse ist den Anlagen 2 und 3 zu entnehmen. Bei der Beschreibung und Interpretation der Meßergebnisse wurden die von FRANZKE ermittelten Werte miteinbezogen.

Die Untersuchung der H.-Stylolithenverteilung erfolgte in 167 Aufschlüssen, wobei von 158 Aufschlüssen mit über 3900 Einzeldaten (durchschnittlich 24 Daten pro Aufschluß) Richtungsdiagramme angefertigt wurden. Aus den H.-Stylolithenrichtungen erfolgte unter Zugrundelegung der Drucklösungstheorie (vgl. Abschnitt 2.1.3.) eine Rekonstruktion der Paläospannungsverteilung.

Von den verbleibenden 9 Aufschlüssen gingen die Einzeldaten gleichfalls in die Interpretation mit ein. Darüber hinaus wurden auf der Grundlage der Klassifizierung von TRURNIT (1967) in einigen Bereichen (Finne-Störung, Ohmgebirgsgrabenzone, Dün und Sub-

herzyne Senke) Detailaufnahmen der H.-Stylolithen durchgeführt.
Die stratigraphische Verteilung der H.-Stylolithen ist der Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5: Stratigraphische Verteilung der H.-Stylolithen

<u>Formation</u>	<u>Anzahl der Aufschlüsse</u>
Zechstein (Werra- u. Staßfurt-Dolomit)	6
Rogensteine des Buntsandsteins	2
Unterer Muschelkalk	147
Oberer Muschelkalk	12
	167

Sigmoidalklüfte wurden in 105 Aufschlüssen des Unteren Muschelkalks aufgenommen.

Erweiterte kleintektonische Untersuchungen (Kluft- und Störungsanalyse) erfolgten in Bereichen mit besonders umfangreichem tektonischem Inventar (u.a. Störungszonen). Der Schwerpunkt der Geländearbeiten lag aber eindeutig in der Erfassung der H.-Stylolithen, da die Aufschlüsse nur übersichtsmaßig auf Hauptkluftrichtungen, Störungs kinematik und Mineralisation untersucht wurden.

Petrophysikalische Untersuchungen zur Bestimmung der Gesteinsanisotropie erfolgten an ca. 200 orientierten Proben aus dem Unteren Muschelkalk, dem Zechstein und der Oberkreide.

Die regionale Verteilung der punktförmigen Aufschlüsse ist sehr unterschiedlich (Anlage 2) und wird im wesentlichen durch die geologischen Aufschlußbedingungen bestimmt. Im allgemeinen handelt es sich um auflässige, z.T. verfüllte Steinbrüche bzw. um natürliche Steilstufen oder Eisenbahn-/Wegeinschnitte.

Der Schwerpunkt der regionalen Bearbeitung lag in der Subherzynyen und der Thüringischen Senke. Die Gliederung und Beschreibung der geologischen Einheiten erfolgt entsprechend dem Fachbereichsstandard "Regionalgeologische Gliederung" des ZGI Berlin (Tab. 6).

Für die Richtungsbezeichnung der Indikationen gilt:

rheinisch	=	NNE-SSW
erzgebirgisch	=	NE-SW
flachherzynisch	=	WNW-ESE
herzynisch	=	NW-SE
eggisch	=	NNW-SSE

Insgesamt ergibt sich gegenüber den bisherigen Untersuchungen (KURZE & NECKE 1979) eine wesentliche Verdichtung der Meßdaten und eine räumliche Erweiterung der bearbeiteten Aufschlüsse. (Im Vergleich zur Dissertation JANSSEN (1983) wird hier nur ein Teil der regionalen Ergebnisse dargestellt.)

Tabelle 6: Gliederung der Untersuchungsgebiete

übergeordnete regionale Einheit	regionale Einheit	Struktur (lokale Einheit)	Struktur-Nr. (Anlage 1)	Gliederungspunkt
Südthüringisch Fränkische Scholle				3.1.
	Rhön-Scholle			3.1.1.
	Heldburg-Scholle			3.1.2.
	Fränkische Störungszone			3.1.3.
Thüringische Senke				3.2.
	Eichsfeld-Scholle			3.2.1.
	Ohmgebirgsgrabenzone		14	3.2.2.
	Bleicherode-Stadtrodaer Scholle			3.2.3.
		Dün	15	3.2.3.1.
	Hainleute	16	3.2.3.2.	
Subherzyne Senke				3.3.
	Harz-Nordrand-Störung			3.3.1.
	Oschersleben-Bernburger Scholle			3.3.2.
		Huy	23	3.3.2.1.
		Hakel	24	3.3.2.2.
		Bernburger Sattel	27	3.3.2.3.
	Allertal-Störungszone			3.3.3.

3.1. Südthüringisch-Fränkische Scholle

Die Südthüringisch-Fränkische Scholle wird im Nordosten durch die Fränkische Störungszone begrenzt und gehört zur Nordspitze der Süddeutschen Großscholle (Anlage 1). Aufgrund dieser regionalgeologischen Position besitzt sie keine eigenständige Entwicklungsgeschichte wie der Thüringer Wald oder die Thüringische Senke (LÜTZNER 1974), sondern ist vielmehr durch die Vergitterung aller für Mitteleuropa wichtigen Strukturrichtungen, die z.T. lineamentären Charakter besitzen wie die Fränkische Störungszone (herzynisch), die Hegau-Heldburg-Zone (rheinisch) und der östliche Randbereich der Mittelmeer-Mjösen-Zone (rheinisch), gekennzeichnet (GRUMBT 1982). Nach WEBER (1975) haben wir es also nicht nur mit einer durch die saxonische Bruchtektonik und die tertiäre Taphrogenkinematik geschaffenen intensiven Zerblockung des Tafeldeckgebirges, sondern auch mit latenten Tiefenstrukturen und einer entsprechenden Schollengliederung zu tun (FRANZKE & JANSSEN 1984).

Das Alter der saxonischen, nicht einaktigen Tektonik wird von LÜTZNER u.a. (1981) als oberjurassisch bis oberkretazisch angegeben. Sie äußert sich in herzynisch bis eggisch streichende Störungszonen. Die jüngere, neogene Tektonik schuf ein an eggischen bis rheinischen Fugen aufreißendes Streifenmuster (LÜTZNER u.a.).

3.1.1. Rhön-Scholle (Anlage 1)

Die Untersuchungen zur Paläospannungsverteilung erfolgten in 11 Aufschlüssen des Unteren Muschelkalks. Ein bei Bad Salzungen gelegener Zechsteinaufschluß wurde in die Interpretation miteinbezogen.

Die Zapfenausrichtung der H.-Stylolithen zeigt neben markanten rheinischen Maxima (25°) auch deutliche herzynische Häufungen (115°). Im einzelnen ergeben die Messungen folgendes Bild (Anlage 2):

- Rheinische Indikationen sind mit Ausnahme des Zechsteinaufschlusses in allen Diagrammen vorhanden und bilden in 2 Aufschlüssen die Hauptmaxima. In 2 weiteren Aufschlüssen sind sie in gleicher Anzahl wie die herzynischen H.-Stylolithen vertreten.
- Die erzgebirgische Richtungsgruppe tritt gegenüber der rheinischen zurück. Teilweise bildet sie mit rheinischen H.-Stylolithen ein zusammenhängendes Maximum.
- Herzynisch streichende H.-Stylolithen repräsentieren sich etwa in gleicher Stärke wie die rheinische Richtungsgruppe.
- Die eggische Richtung ist im Vergleich zu anderen Richtungen nur sehr schwach vertreten.

Sigmoidalklüfte wurden in zwei Aufschlüssen aufgenommen. Sie streichen konstant zwischen $180 - 190^{\circ}$ und fallen mit 65° nach Westen ein (Anlage 3).

Petrophysikalische Anisotropieuntersuchungen (Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen) erfolgten an Proben aus dem Unteren Muschelkalk (Aufschluß Kaltennordheim). Die sieben verwertbaren Meßergebnisse zeigen wie bei den H.-Stylolithen eine zweigipflige Verteilung, d.h., es ergibt sich eine deutliche Geschwindigkeitsanisotropie (vpmin) in NW-SE und NE-SW Richtung (Abb. 18).

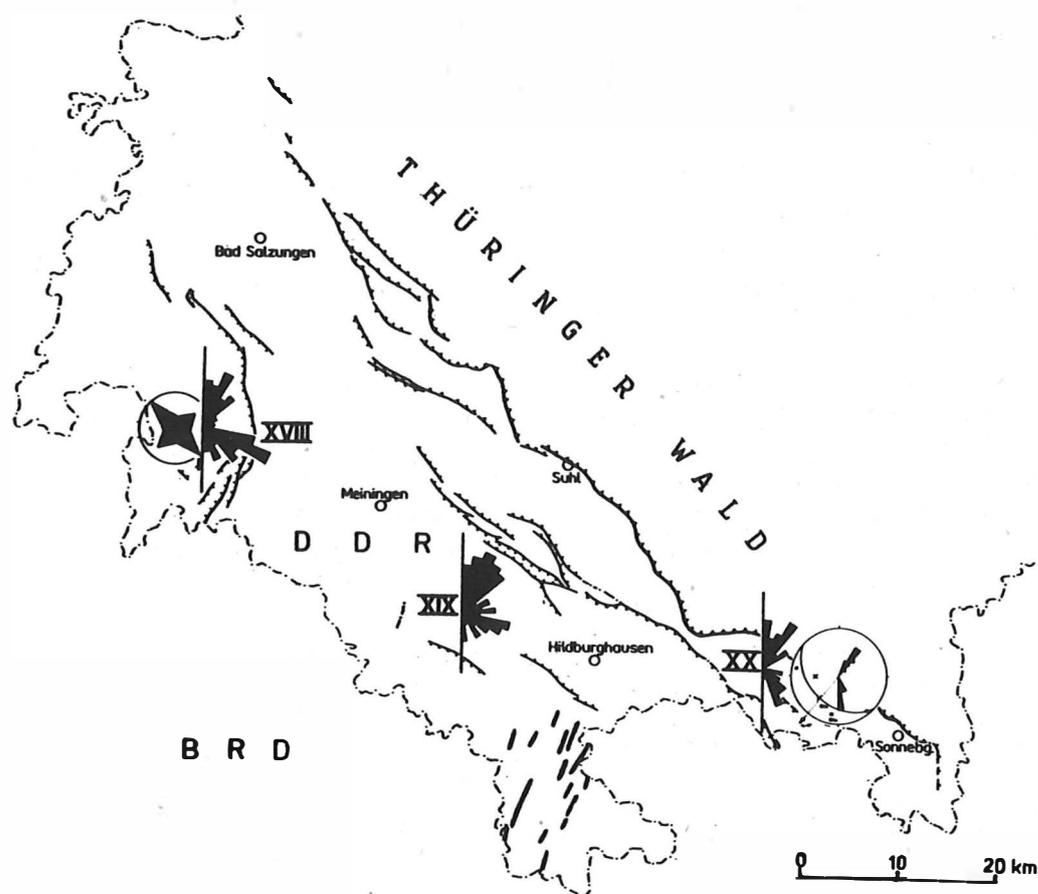


Abb. 18 Zusammengefaßte H.-Styrolithendiagramme, Geschwindigkeitsanisotropien und Kleintektonik im Bereich der Südthüringisch-Fränkischen Scholle (Legende vgl. Anlage 7)

3.1.2. Heldburg-Scholle (Anlage 1)

Kleintektonische Untersuchungen erfolgten in 9 Aufschlüssen des Unteren Muschelkalks. Die H.-Styrolithenverteilung ist wie in der Rhön-Scholle durch eine relative Richtungsvielfalt charakterisiert. Deutlich wird weiterhin ein Richtungswechsel der H.-Styrolithenmaxima auf engstem Raum. Für die jeweiligen Richtungsgruppen ergeben sich folgende Aussagen (Anlage 2):

- Die rheinische Richtungsgruppe ist in sieben von 8 Aufschlüssen vertreten. Sie bildet in 3 Aufschlüssen das 1. und in 2 weiteren das 2. Maximum. Ihre dominierende Stellung kommt auch in dem zusammengefaßten Richtungsdiagramm zum Ausdruck

(Abb. 18). Innerhalb der Gruppe ist eine gleichmäßige Streuung ($0-30^{\circ}$) kennzeichnend.

- Erzgebirgisch streichende H.-Stylolithen bilden mit der rheinischen Richtungsgruppe zusammenhängende Maxima, bleiben aber hinter dem rheinischen Maximum zurück.
- Die herzynische Richtung ist in allen Aufschlüssen vorhanden und bildet nach der rheinischen Richtungsgruppe die stärksten Maxima.
- Eggisch streichende H.-Stylolithen wurden nur in 4 Aufschlüssen aufgenommen. Sie treten insgesamt stark zurück.

Sigmoidalklüfte, in 3 Aufschlüssen gemessen, streichen in etwa N-S und fallen mit 40° nach Westen ein (Anlage 3).

3.1.3. Fränkische Störungszone (Anlage 1)

Die Fränkische Störungszone bildet die Grenze zwischen Thüringer Wald und Südthüringisch-Fränkische Scholle. Es handelt sich um eine kompliziert gebaute Störungszone, wobei Flexuren, Auf-, Ab- und Überschiebungen einander ablösen (LÜTZNER 1974). Der gleiche Autor wies nach, daß die regionaltektonische Bedeutung der Fränkischen Störungszone nach Südosten zunimmt, während sie nach Nordwesten abklingt. Die Untersuchungen in 4 Aufschlüssen des Unteren Muschelkalks konzentrierten sich auf den Südostabschnitt (Raum Eisfeld). Der Aufschluß Brunn bei Eisfeld im Randbereich des kleinen Thüringer Waldes wurde in die Auswertung miteinbezogen.

Die H.-Stylolithenverteilung ist in den Aufschlüssen durch eine große Übereinstimmung gekennzeichnet (Anlage 2):

- Rheinische Indikationen sind in allen Aufschlüssen vorhanden, bleiben aber in der Mehrzahl hinter dem erzgebirgischen Maximum zurück.
- Erzgebirgisch streichende H.-Stylolithen, die sich deutlich von der rheinischen Richtung absetzen, dominieren in 2 von 4 Aufschlüssen.
- Die herzynische Richtung bleibt hinter den beiden bereits genannten Richtungen zurück.
- Eggisch streichende H.-Stylolithen bilden im Aufschluß Brunn bei Eisfeld neben der erzgebirgischen Richtung ein weiteres Maximum, während sie in den anderen Aufschlüssen völlig fehlen.

Sigmoidalklüfte konnten nur in einem Aufschluß gemessen werden. Sie streichen ca. 170° bis 180° und fallen mit 40° nach Osten ein (Anlage 3).

Erweiterte kleintektonische Untersuchungen im Aufschluß Brunn bei Eisfeld zeigen deutliche Symmetriebeziehungen der H.-Stylolithen zu strukturkonformen Dehnungsformen (mineralisierte Zugklüfte, Abschiebungen mit zugehörigen Harnischrillungen) und Einengungsformen (Auf- und Überschiebungsbahnen mit Harnischspuren, Schichtverfaltung u.a.; FRANZKE & JANSSEN 1984/Abb. 18).

Zusammenfassung und Interpretation Südthüringisch-Fränkische Scholle

Der besondere tektonische Charakter des in der Nordspitze der Süddeutschen Großscholle gelegenen Untersuchungsgebietes, sichtbar durch die Vergitterung rheinischer und herzynischer Bruchstrukturen, findet sowohl in der H.-Stylolithenverteilung als auch in den Ergebnissen der Anisotropieuntersuchungen seine Bestätigung (Abb. 18). So sind die rheinischen Maxima besonders deutlich in der Hegau-Heldburg-Zone und der Oströhn, also in Bereichen großer rhenotyper Strukturzonen erkennbar (FRANZKE & JANSSEN 1984), während die herzynische Richtung mehr in Verbindung mit lokalen und regionalen Störungs-

zonen zu sehen ist (Viernauer- und Marisfelder Störungszone u.a./Anlage 4).

Die mögliche Bindung der rheinischen und erzgebirgischen H.-Stylolithen an den überregionalen Bauplan wird auch durch den Vergleich der H.-Stylolithenrichtungen mit der Mächtigkeitkarte der Terebratelzone des Unteren Muschelkalks sichtbar (Anlage 5).

So ergibt sich sowohl für den Westteil der Südthüringisch-Fränkischen Scholle (rheinisch) als auch für den Ostteil (erzgebirgisch) eine Übereinstimmung zwischen Richtungsmaxima der H.-Stylolithen und dem Isopachenverlauf.

Neben der vermuteten Bindung der H.-Stylolithenrichtungen an überregionale und lokale Strukturen muß vor allem in Bereichen von Störungszonen mit einer lokalen Beeinflussung der H.-Stylolithenrichtungen durch das tektonische Flächeninventar gerechnet werden (Klüfte, Wellenstreifen, Störungen u.a./FRIEDEL 1985).

Die zweiseitige Ausrichtung der H.-Stylolithen steht im gewissen Gegensatz zu den Untersuchungsergebnissen wie sie im mittleren und südlichen Teil der Süddeutschen Großscholle auf dem Territorium der BRD erzielt wurden. Von mehreren Autoren wird hier eine einheitliche Dominanz der rheinischen Richtung angegeben (WAGNER 1967, BEIERSDORF 1969, WUNDERLICH 1973, ILLIES 1974, BUCHNER 1978/Abb. 19). Die Ursache für die unterschiedliche Orientierung wird vom Verfasser in der eingangs beschriebenen besonderen tektonischen Position des Untersuchungsgebietes gesehen.

Das Fehlen von Unterschieden in der Orientierung der H.-Stylolithen zwischen benachbarten Aufschlüssen aus dem Unteren Muschelkalk und dem Zechstein spricht - unter Voraussetzung der Stylolithenbildung vor Abschluß der Diagenese - für ein langfristig, beständiges Spannungsregime (vgl. Abschn. 5.4.1.).

3.2. Thüringische Senke

Die Thüringische Senke ist durch eine deutliche herzynische Längserstreckung gekennzeichnet. Sie wird durch den Thüringer Wald im Südwesten, das Thüringer Schiefergebirge im Südosten, dem Leinetalgraben im Nordwesten, der Röthaer Störung, Hallischen Störung und Blankenheimer Störung im Norden begrenzt (Anlage 1).

Die nachfolgende kurze Skizzierung der tektonischen Entwicklung der Thüringischen Senke erfolgt in dem Maße, wie es zum Verständnis der Interpretation der Paläospannungsanalyse im Tafeldeckgebirge erforderlich ist. Als Grundlage dient die Veröffentlichung von WEBER (1977).

Bereits während des Molassestadiums ist das Untersuchungsgebiet durch eine intensive Zerblockung gekennzeichnet. Große Bedeutung erlangen NNW-SSE Brüche neben den als Schollenkonturen fungierenden NW-SE Strukturen. NNE-SSW Bruchzonen verursachen in diesem Schollenfeld übergeordnete Einmuldungen. Die Aktivierung der NNE-SSW Strukturen hält während des ganzen Oberperms an und beherrscht während der Trias das gesamte Schollenfeld Mitteleuropas.

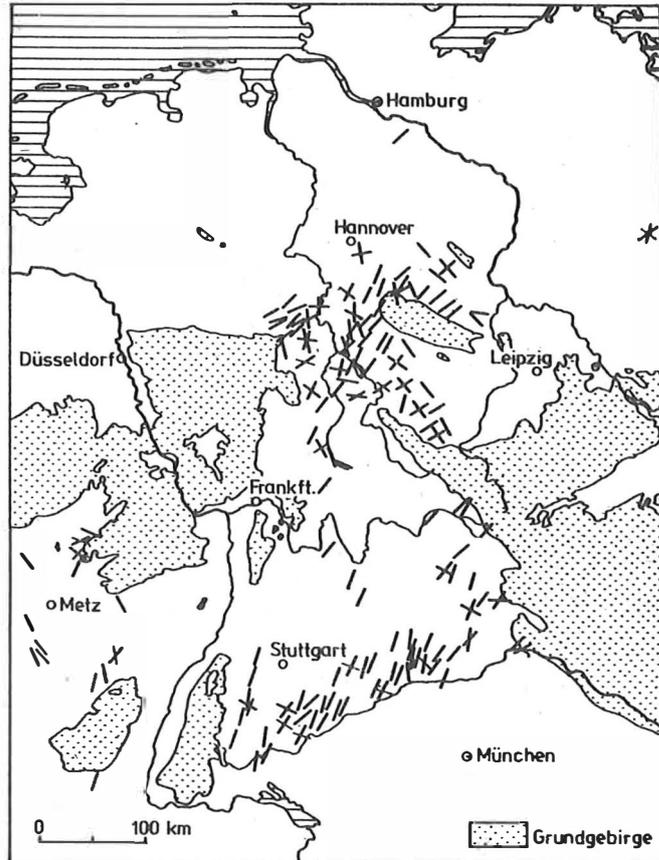


Abb. 19 Horizontalstylolithen in Zentraleuropa
(ergänzt nach H. BEIERSDORF 1967)

Als wichtige paläotektonische Strukturelemente treten die Hessische Senke und die Altmark-Eichsfeld-Schwelle in Erscheinung. Im Jura vollzieht sich dann ein grundlegender Umbau im Strukturplan. Während im Lias und Dogger NNE-SSW Elemente bestimmend sind, dominieren im Malm bereits NW-SE Strukturen. In der Kreide steigern sich die Schollenbewegungen. Vor allem werden die WNW-ESE Leistenschollen angeregt. Während des Tertiär kommt es nach anfänglicher Fortsetzung der kretazischen Bruchtektonik ab Eozän zu Dehnungstendenzen an NNE-SSW und NE-SW Schollengrenzen.

Das heutige Bild der Thüringischen Senke wird von weithin verfolgbaren Störungszonen bestimmt (Hainich-Saalfelder Störungszone, Finne-Störungszone u.a.), die es äquidistant in nahezu gleichbreite herzynische Leistenschollen zerlegen. Die kleintektonischen Untersuchungen zur Rekonstruktion der Paläospannungsverteilung konzentrierten sich neben den Störungszonen (Finne-Störung, Eichenberg-Gothaer-Störungszone/vgl. JANSSEN 1983) vor allem auf die relativ ungestörten Bereiche im Nordost- und Zentralteil der Thüringischen Senke.

3.2.1. Eichsfeld-Scholle

Die trapezförmige Scholle am NW-Rand der Thüringischen Senke wird im Südwesten durch die Hainich-Saalfelder Störungszone, im Südosten durch die Ohmgebirgsgrabenzone und im Nordwesten durch den Leinetal-Graben begrenzt (Anlage 1). Obwohl Teil der Thüringischen Senke, besitzt sie jedoch in tektonischer und paläogeographischer Hinsicht weitgehende Selbständigkeit (LÜTZNER 1974). Für Trias und Zechstein ist eine Schwellenfazies kennzeichnend, die sich in Faziesänderungen und Mächtigkeitsreduktionen äußert. Die paläogeographisch belegte und rheinisch streichende Eichsfeldschwelle tritt bereits im Rotliegenden in Erscheinung und läßt sich postum bis in den Unteren Keuper verfolgen (LÜTZNER 1974). Nach dem gleichen Autor sind für das westliche Eichsfeld, wo sich die Untersuchungen konzentrierten, rheinische Strukturen bestimmend.

Die Richtungsanalyse der H.-Stylolithen ergibt folgende Verteilung in 8 Aufschlüssen des Unteren Muschelkalks (Anlage 2):

- Die rheinische Richtungsgruppe bildet in allen Aufschlüssen das absolut bestimmende Hauptmaximum.
- Erzgebirgisch streichende H.-Stylolithen bilden mit der rheinischen Richtung ein zusammenhängendes Maximum, bleiben dabei aber klar in der Unterzahl.
- Herzynische und eggische Indikationen sind ohne Bedeutung.

Im Aufschluß Kreuzebra konnte an einem Beispiel beobachtet werden, daß rheinische H.-Stylolithen an herzynischen versetzt werden.

Sigmoidalklüfte wurden in einem Aufschluß gemessen. Sie streichen wie im übrigen Untersuchungsgebiet ca. N-S und fallen mit 55° nach Westen ein (Anlage 3).

Die Interpretation der Untersuchungsergebnisse erfolgt im Zusammenhang mit den Messungen im Bereich des Ohmgebirgsgrabens und der Bleicheroda-Stadtrodaer Scholle.

3.2.2. Ohmgebirgsgrabenzone

Die Ohmgebirgsgrabenzone ist eine zwischen Dün und Hainleite verlaufende rheinische Grabenzone (Anlage 1), die sich aus folgende 4 Teilstücke zusammensetzt (DIETZ 1923/25):

- Worbiser Graben
- Holunger Graben
- Iberggraben bei Weißenborn
- Allerburg-Grabenzone bei Bockelnhagen.

Stratigraphisch sind die Schichten des Zechstein bis zur Oberkreide aufgeschlossen, wobei Unterer Muschelkalk den Hauptbestandteil der Grabenfüllung bildet. Die Anlage der Worbiser Grabenzone fällt in die jungkimmerische Phase der saxonischen Gebirgsbildung, während eine zweite Aktivierungsphase Cenoman und Oligozän eingestuft wird (DIETZ 1923/1925). Im Gegensatz dazu entstand der Holunger Graben hauptsächlich als postcenomaner Einbruch (KNAPE 1957). KNAPE kommt zu dem Ergebnis, daß alle kleintektonischen Verformungen auf Einengungskräfte senkrecht zur herzynischen Richtung zurückzuführen sind. Weiterhin geht er davon aus, daß sowohl die rheinische als auch die herzynische Tektonik ein und demselben Kräfteplan zuzuordnen sind und daher auch keine wesentlichen Unterschiede aufweisen.

Die Untersuchungen zur Paläospannungsverteilung erfolgten in 9 Aufschlüssen des Unteren Muschelkalks, wobei sich aufgrund der Aufschlußverhältnisse eine Konzentration auf das Gebiet des Worbiser Grabens ergab.

Die Messungen der H.-Stylolithen ergeben folgende Verteilung (Anlage 2):

- Die rheinische Richtungsgruppe dominiert in fast allen Aufschlüssen. Sie ist am besten geregelt und streicht zwischen 10° und 30° .
- Erzgebirgisch streichende Indikationen bilden mit den rheinischen H.-Stylolithen ein zusammenhängendes Maximum. In 2 Aufschlüssen (Worbis und Kirchworbis) ist die erzgebirgische Richtung stärker als die rheinische besetzt.
- Die herzynische Richtung tritt gegenüber den beiden genannten Richtungen deutlich zurück und wurde nur in wenigen Aufschlüssen gemessen.
- Die eggische Richtung ist nicht belegt.

Detailaufnahmen zur Beschreibung der Geometrie und Morphologie der H.-Stylolithen erfolgten in zwei Aufschlüssen.

- | | |
|----------------|--|
| Worbis: | - Kegelförmige H.-Stylolithen, Zapfenlänge 2-4 mm, Stylolithenfläche nicht an Schichtflächen gebunden, Zapfenachse verläuft spitzwinklig zur Stylolithenfläche. |
| Kirchhohmfeld: | - Kegelförmige H.-Stylolithen, Zapfenlänge 1-3 mm, Stylolithenfläche aufgerissen und mit Kalzit verheilt.
- H.-Stylolithenanzahl scheint mit zunehmender Entfernung zur Störungszone abzunehmen (unsicher); Orientierung der Zapfenachsen paßt sich der Lage der Störungszone an (?). |

Die gemessenen Sigmoidalklüfte streichen zwischen 180° - 190° und fallen mit 40° nach Westen ein (Anlage 3).

Erweiterte kleintektonische Untersuchungen (Kluftmessungen) bestätigen die von KNAPE (1957) getroffene Aussage, daß die Klüfte in Grabennähe überwiegend in rheinischer und untergeordnet in herzynischer Richtung streichen, wobei sich nach KNAPE alle Richtungen - auch die herzynische - durch Weitung auszeichnen.

Petrophysikalische Untersuchungen (Messungen der Ausbreitungsgeschwindigkeiten elastischer Wellen) an orientierten Proben aus dem Unteren Muschelkalk ergaben keine auswertbaren Ergebnisse

Zur Interpretation vergleiche Abschnitt 3.2.3.

3.2.3. Bleicherode-Stadtrodaer Scholle

Die NW-SE streichende Leistenscholle am NE-Rand der Thüringischen Senke wird im Südwesten durch die Schlotheim-Leutraer Störungszone, im Nordwesten durch die Ohmgebirgsgrabenzone und im Nordosten durch die Finne-Störungszone begrenzt (Anlage 1).

3.2.3.1. Dün (Anlage 1)

Tektonisch stellt der Dün eine relativ ungestörte Plattenstruktur dar, die als rheinisch streichende Zone die Bleicheröder Berge von der Ebelebeher Keupermulde trennt (LÜTZNER 1974). Die Untersuchungen zur Paläospannungsverteilung erfolgten in 9 Aufschlüssen des Unteren Muschelkalks.

Die Messungen der H.-Stylolithen ergeben folgende Verteilung (Anlage 2):

- Rheinisch bis erzgebirgisch ($30-40^{\circ}$) streichende H.-Stylolithen bilden in allen Aufschlüssen die Hauptmaxima.
- Herzynische Indikationen bleiben deutlich hinter der erstgenannten Richtungsgruppe zurück.
- Die eggische Richtung ist nicht belegt.

Detailaufnahmen der H.-Stylolithen wurden im Aufschluß Reifenstein durchgeführt:

- Kegelstumpfförmige H.-Stylolithen, Zapfenlänge 2-5 mm, Kopf der Stylolithen zeigt selbst Drucklösungserscheinungen (Abb. 28), parallele Seitenflächen der kegelstumpfförmigen H.-Stylolithen bilden gleichzeitig die Seiten des Gegenstylolithen.
- Unterschiedliche H.-Stylolithenrichtungen auf einer Stylolithenfläche (Abb. 28).

Die Sigmoidalklüfte streichen konstant $170-180^{\circ}$ und fallen mit 55° nach Westen ein (Anlage 3).

Petrophysikalische Untersuchungen (Messungen der Ausbreitungsgeschwindigkeiten elastischer Wellen) erfolgten an orientierten Proben aus dem Tagebau Deuna (Unterer Muschelkalk). Von den 13 untersuchten Proben zeigten 6 (46 %) eine Geschwindigkeitsanisotropie (V_{\min}) in der N-S Richtung, jeweils 3 (23 %) in NE-SW und SE-NW und eine in E-W Richtung (8 %). Damit wird die rheinische Vorzugsrichtung in der Stylolithenorientierung auch durch die Geschwindigkeitsanisotropie belegt (Abb. 20).

3.2.3.2. Hainleite (Anlage 1)

Die Hainleite ist eine herzynisch streichende Sattelstruktur, die ähnlich wie der Dün als Muschelkalkplatte ausstreicht (LÜTZNER 1974).

Die Messungen der H.-Stylolithen zur Rekonstruktion der Paläospannungsverteilung erfolgten in 10 Aufschlüssen des Unteren Muschelkalks und ergeben eine ähnliche Verteilung wie im Dün, in der Ohmgebirgsgrabenzonenzone und im Eichsfeld (Anlage 2):

- Rheinisch streichende H.-Stylolithen dominieren in sämtlichen Aufschlüssen. Innerhalb dieser Richtungsgruppe ist das Hauptmaximum zwischen $20-30^{\circ}$ konzentriert.
- Erzgebirgische Indikationen bleiben hinter dem rheinischen Maximum zurück, bilden aber oft mit der rheinischen Richtung ein zusammenhängendes Maximum.
- Herzynisch und eggisch streichende H.-Stylolithen bleiben ohne Bedeutung.

In 2 Aufschlüssen (Gebraer Berg, Kleinberndten) konnten die rheinischen H.-Stylolithen gegenüber den herzynischen als die älteren ausgehalten werden.

Detailaufnahmen zur Beschreibung der Morphologie und Geometrie der H.-Stylolithen erfolgten im Aufschluß nordwestlich Kleinberndten:

- Rheinische H.-Stylolithen sind als kegelstumpfförmige Zapfen mit parallelen Seitenflächen ausgebildet (fortgeschrittener Drucklösungskontakt, Abb. 28), Zapfenlänge 6-8 mm.
- Parallel dazu zweite rheinische H.-Stylolithengeneration mit kegelförmiger Ausbildung, Zapfenlänge 2-3 mm (Abb. 28).
- Herzynische H. Stylolithen gleichfalls mit kegelförmiger Ausbildung, Zapfen sehr lang und dünn.

Sigmoidalklüfte konnten in 4 Aufschlüssen aufgenommen werden. Sie streichen ohne Ausnahme N-S und fallen nach Westen ein (Anlage 3).

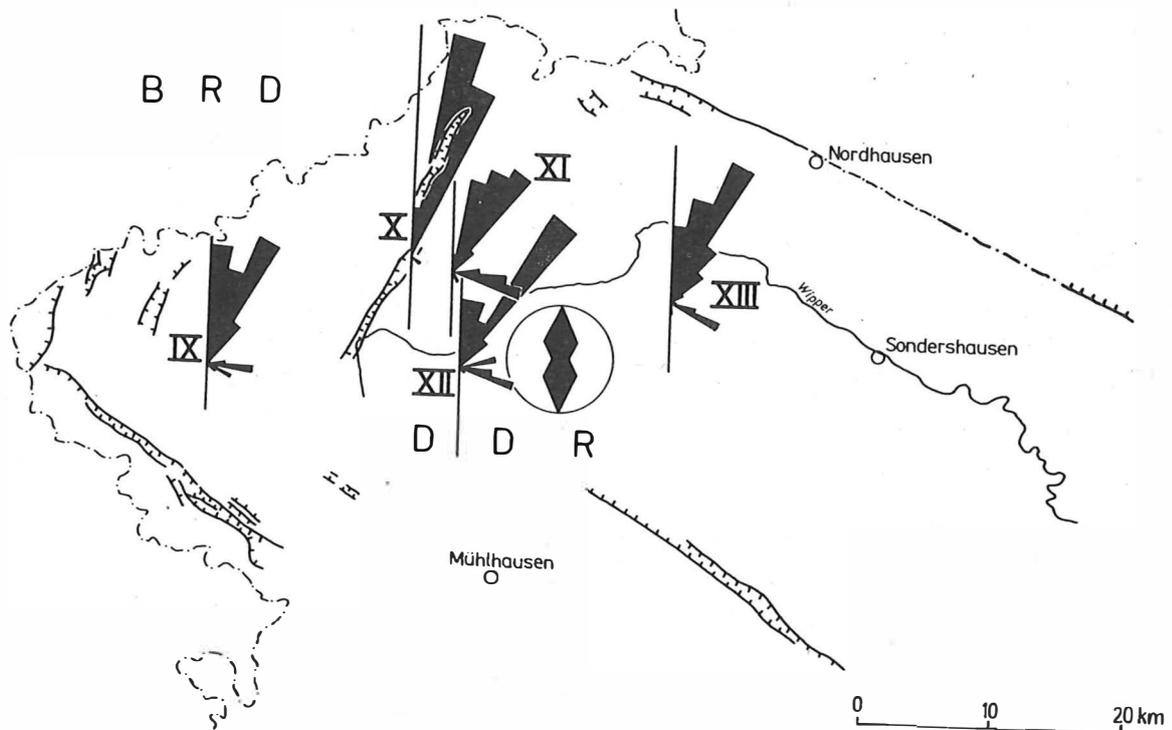


Abb. 20 Zusammengefaßte H.-Stylolithendiagramme
und Geschwindigkeitsanisotropien im NW-Teil
der Thüringischen Senke
- Legende vgl. Anlage 7 -

Zusammenfassung und Interpretation

Eine Bewertung der rekonstruierten Spannungsverteilung im Bereich der Bleicherode-Stadtrodaer Scholle kann nur unter Einbeziehung der nordwestlichen Nachbargebiete (Eichsfeld-Scholle, Ohmgebirgsgrabenzone) erfolgen, da für den gesamten NW- und Zentralteil der Thüringischen Senke die Dominanz rheinisch streichender H.-Stylolithen absolut bestimmend ist. Das wird besonders in den zusammengefaßten Richtungsdiagrammen der jeweiligen Strukturbereiche deutlich (Abb. 20). Die rheinischen H.-Stylolithen im NW-, Zentral- und SE-Teil der Bleicherode-Stadtrodaer Scholle lassen, wie in der Südthüringisch-Fränkischen Scholle bereits beschrieben, einen Zusammenhang mit der Strukturierung des Untergrundes erkennen, d.h., der Schollenbau, der sichtbar wird in Mächtigkeitsgradienten und Lithofaziesveränderungen der Sedimente, beeinflußt nach dem Postumitätsprinzip die Spannungsverteilung im Deckgebirge und somit auch die Richtungen der H.-Stylolithen (Anlage 5, 6). In diesem Zusammenhang soll auch auf die besondere paläotektonische Situation im nordwestlichen Teil der Thüringischen Senke verwiesen werden, wo die benachbarten Schollenfugen (Hessische Gräben als Teilelement der Mittelmeer-Mjösen-Zone, Eichsfeld-Schwelle) die Paläospannungsanordnung modifizieren (Anlage 4).

Bestätigt werden diese Überlegungen durch das regionale Zusammentreffen der rheinischen H.-Stylolithenmaxima im Zentralteil der Thüringischen Senke mit der von RAST (1966) beschriebenen rheinisch streichenden Schwächezone (Gera-Unstrut-Zone) sowie mit einer stark positiven Wärmeflußanomalie (MEINECKE u.a. 1966). Letztere geht nach Meinung der Autoren auf das Relief der Grundgebirgsoberkante zurück.

3.3. Subherzzyne Senke

Die Senkungsstruktur im Westteil der Sächsisch-Thüringischen Großscholle umfaßt den Raum zwischen Harz-Nordrandstörung im Süden und der Flechtingen-Roßlauer Scholle im Norden (Anlage 1). Nahe dem Harznordrand ist das variszische Grundgebirge 3000 bis 4000 m unter NN abgesenkt. In Richtung Flechtinger Scholle vollzieht sich ein allmählicher Anstieg. Die regionale Stellung der Subherzzyne Senke wird im wesentlichen durch ihre Lage am Südrand der NPS bestimmt. Wie in der NPS ist die tektonische Geschichte durch eine etappenweise Entwicklung gekennzeichnet. Die einzelnen Entwicklungsetappen werden durch tektonische Bewegungsphasen getrennt, die sich in einer strukturellen Differenzierung in Einzelschollen widerspiegeln (STACKEBRANDT 1983).

Folgende als Schollengrenzen fungierende Bruchstrukturen haben entscheidende Bedeutung für die tektonische Entwicklung des Untersuchungsgebietes:

In herzynischer Richtung sind das

Harz-Nordrandstörung, Allertal-Störungzone, Störung Südflanke Quedlinburger Sattel sowie Haldenslebener und Gardelegener Abbruch als Teilelemente der Mitteldeutschen Hauptabbrüche.

In rheinischer Richtung treten Teilstörungen der Mittelmeer-Mjösenzone auf, die sich besonders an der Westflanke des Harzes häufen, im Zentralteil der Subherzzyne Senke jedoch nur an Mächtigkeits- und Faziesänderungen erkennbar sind (Eichsfeld-Altmark-Schwellen / STACKEBRANDT).

Die wichtigsten Regionalstrukturen, in deren Bereich die Untersuchungen erfolgten, sind: Harz-Nordrandstörung, Huy, Hakel, Aschersleben-, Staßfurter- und Bernburger Sattel, sowie die Allertal-Störungszone. Sämtliche Strukturbereiche gehören in ihrer Gesamtheit zur Subherzynen Senke, jedoch widerspiegeln sie jeweils eine unterschiedliche geologisch-tektonische Entwicklung. Neben Aufschlüssen im Gebiet von Störungszonen stehen Aufschlüsse aus relativ ungestörten Schollenbereichen und solche, die an Salinarstrukturen gebunden sind.

Ziel der Untersuchungen in der Subherzynen Senke ist nicht die tektonische Analyse einzelner Strukturbereiche wie sie u.a. von STACKEBRANDT (1982) erfolgte, sondern ähnlich wie in der Thüringischen Senke soll geprüft werden, inwieweit differenzierte geologische und tektonische Entwicklungen (u.a. Mächtigkeits- und Faziesänderungen) in der Paläospannungsverteilung ihren Ausdruck finden.

3.3.1. Harz-Nordrandstörung (Anlage 1)

Die Harz-Nordrandstörung als herzynisch streichende Schollengrenze trennt die südlich gelegene Harzscholle von der Subherzynen Senke. Es ist ein variszisch angelegtes tektonisches Element, dessen Entwicklung über das Flexur- und Abschiebungsstadium im Jura bis zur Heraushebung der Harzscholle mit NE-vergenter Auf- und Überschiebungstendenz in der Oberkreide führte (STACKEBRANDT 1982).

Die Untersuchungen im Gebiet der Harz-Nordrandstörung erfolgten in 9 Aufschlüssen des Unteren Muschelkalks und in je einem der Oberkreide und des Buntsandsteins. Eine Analyse der Paläospannungsverteilung, abgeleitet aus der Zapfenorientierung der H.-Stylolithen, zeigt für die Aufschlüsse des Unteren Muschelkalks folgende Verteilung (Anlage 2, Abb. 21):

- Die rheinische Richtungsgruppe bildet in 6 von 9 Aufschlüssen die stärksten Maxima, wobei eine genaue Trennung von den erzgebirgisch streichenden H.-Stylolithen nicht möglich ist.
- Herzynische Indikationen wurden in allen Aufschlüssen gemessen, bleiben aber mit Ausnahmen der Aufschlüsse Thüle, Roseburg bei Rieder und mit Vorbehalt im Aufschluß bei Wernigerode (zu geringe Anzahl der Indikationen) hinter den rheinischen Maxima zurück.
- Eggisch streichende H.-Stylolithen bleiben ohne Bedeutung.

Setzt man die Richtungsmaxima der H.-Stylolithen in Beziehung zum Verlauf der Schollengrenzen so fällt auf, daß im Ostteil in allen untersuchten Aufschlüssen die rheinische Richtung dominiert, während im Zentral- und Westteil der Harz-Nordrandstörung (bis zur Staatsgrenze) rheinische und herzynische Richtungsmaxima einander ablösen.

Die Richtungsvielfalt in der H.-Stylolithenverteilung muß ähnlich wie in der Südthüringisch-Fränkischen Scholle in enger Beziehung zu den im Bereich einer Störungszone besonders zahlreichen tektonischen Gefügeelementen gesehen werden.

Im Bereich der Harz-Nordrandstörung ließ sich wiederum nachweisen, daß die Bildung der H.-Stylolithen in den Karbonatgesteinen vor der Aufrichtung der Schichten bereits beendet war, da die H.-Stylolithen ähnlich wie in den Bereichen der herzynischen Störungszonen der Thüringischen Senke um die gleichen Beträge wie der geschleppte Schichtverband mit verstellt wurden (JANSSEN & FRANZKE 1984; vgl. auch KURZE & NECKE 1979).

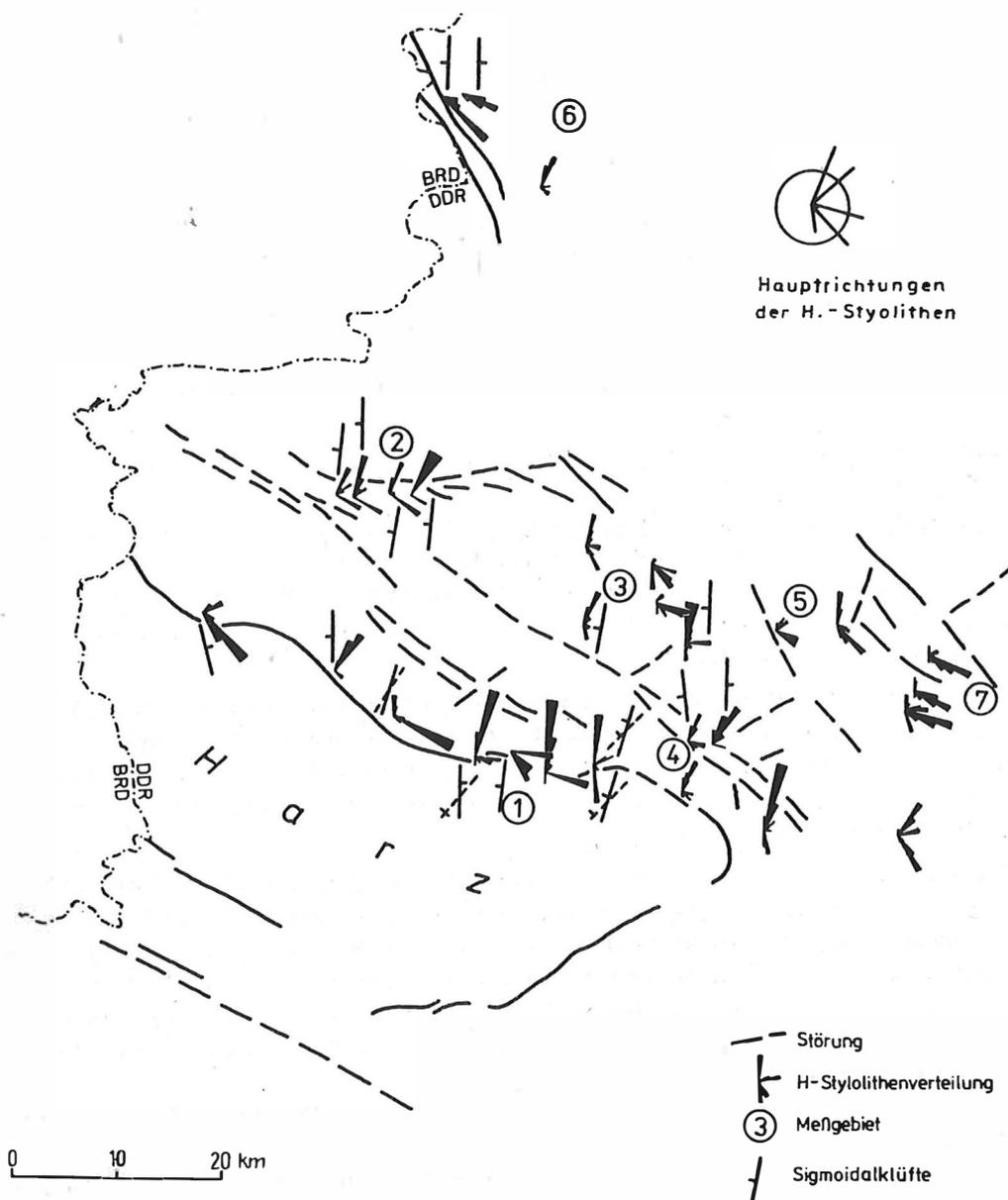


Abb. 21 Verteilung der H.-Stylolithen und Sigmoidalklüfte in der Subherzynen Senke

In den Plänerkalkaufschlüssen der Oberkreide konnten im Gegensatz zu HOSSEINIDUST (1980) keine H.-Stylolithen beobachtet werden. HOSSEINIDUST stellte am Oberharz (BRD) NNE bis NE streichende H.-Stylolithen fest, die er mit der Aufschiebungstektonik am Harznordrand in Verbindung bringt.

Detailaufnahmen ermöglichten folgende Aussagen zur Geometrie und Morphologie der H.-Stylolithen:

- Gernrode: - Kegelstumpfförmige H.-Stylolithen, sehr weitständig, Zapfenlänge bis 10 mm.
 - Kegelförmige H.-Stylolithen, engständig, Zapfenlänge bis 3 mm.
 - An der Stirnfläche der kegelstumpfförmigen H.-Stylolithen setzt sich die Drucklösung fort.
- Ermsleben: - Kegelförmige H.-Stylolithen, Zapfenlänge bis 3 mm, Stylolithenfläche bis 50 mm.
 - Richtungsänderung der Zapfenachse innerhalb eines H.-Stylolithen.
 - Übergang vom Stylolithen zur Harnischbildung (?).
- Thale: - Kegelförmige und kegelstumpfförmige Ausbildung der H.-Stylolithen, Zapfenlänge 3-8 mm, Durchmesser der Zapfen nimmt mit ihrer Länge zu.
- Welbsdorf: - Kegelförmige H.-Stylolithen in Glaskalken, Zapfenlänge 3-5 mm, Stylolithenfläche an Schichtgrenze absetzend.
- Kloster
 Michaelstein: - "Mikrostylolithenzapfen", kegelförmig, Zapfenlänge kleiner als 1 mm.

Sigmoidalklüfte wurden in 6 Aufschlüssen des Unteren Muschelkalks gemessen. Sie streichen N-S und fallen nach Westen ein (Anlage 3, Abb. 21).

Erweiterte kleintektonische Untersuchungen (Kluftanalyse) konzentrierten sich auf die Aufschlüsse Kloster Michaelstein (Unterer Muschelkalk) und Ballenstedt (Oberkreide). Die Auswertung der im Unteren Muschelkalk aufgenommenen Klüfte im Gefügediagramm zeigt, daß dem Diagramm zwei verschiedene Kluftsysteme zugrunde liegen, die wie folgt interpretiert werden (Abb. 22):

- a) Ein älteres, primäres oder fundamentales Kluftsystem im Sinne von BOCK (1980) mit Kluftmaxima in NW-SE und ENE-WSW (NE-SW) Richtungen. Die Hauptnormalspannung (σ_1) ist senkrecht zum Schichteinfallen orientiert, d.h., die Klüfte stehen im Zusammenhang mit der Diagenese. Viele H.-Stylolithen sind an die primären Kluftsysteme gebunden.
- b) Zusätzlich deutet sich im Diagramm ein zweites, jüngerer Kluftsystem mit gleichem Richtungsmaxima, aber flacherem Einfallen an. Hierbei handelt es sich um Querdehnungsklüfte (Zugklüfte) im Sinne von BANKWITZ (1966), wobei die Hauptklüfte parallel zur Hauptkompressionsachse stehen und gewissermaßen die Hauptebenen der Deformation markieren (BANKWITZ 1980). Die Hauptnormalspannung (σ_1) ist hier an die kompressive Bewegungskomponente bei der Heraushebung der Harzscholle gebunden.

Betrachten wir die Kluftmaxima im Zusammenhang mit der aus H.-Stylolithenorientierung und Deformationsstrukturen ermittelten Richtung der Hauptnormalspannung (σ_1), so ergibt sich zwischen Hauptkluftmaximum (ENE-WSW) und der H.-Stylolithenrichtung (NNE-SSW) eine Abweichung von 20-30° (Abb. 22). Diese Winkeldifferenz erklärt sich aus der prädislokativen Anlage der H.-Stylolithen.

Das in den Plänerkalken (bei Ballenstedt) aufgenommene Hauptkluftmaximum streicht N-W bis NNE-SSW und fällt nach Westen ein (Abb. 22). Genetisch werden die Klüfte gleichfalls als Querdehnungsklüfte interpretiert und dem Spannungsplan mit erzgebirgischer σ_1 -Richtung während des Auf- und Überschiebungsstadiums des Harzes zugeordnet. Die Differenz zwischen rheinischer Klufttrichtung und erzgebirgischer Hauptnormalspannung (σ_1) ist nicht ungewöhnlich. BANKWITZ (1978) wies nach, daß häufig Winkel zwischen Klufttrichtung und Hauptnormalspannung auftreten, ohne, daß dabei Scherklüfte entstehen.

Das kleinere, etwa E-W streichende Maximum ist nach Beobachtung von STACKEBRANDT (1982) älter und an die Verbiegung der Schichten bei der Heraushebung des Harzes gebunden.

Das petrophysikalische Untersuchungsprogramm umfaßte die Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeiten elastischer Wellen an 20 Proben aus dem Unteren Muschelkalk (Gernrode) und an 15 Proben aus der Oberkreide bei Ballenstedt. Die Proben aus der Oberkreide erbrachten eine Anisotropie mit einem - statisch nicht gesicherten - Geschwindigkeitsminimum (V_{pmin}) in N-S (NNE-SSW) Richtung (Abb. 22). Bei den Proben aus dem Muschelkalk sind keine Richtungsabhängigkeiten feststellbar. Die Messungen des spezifischen Widerstandes ergaben keine auswertbaren Anisotropien.

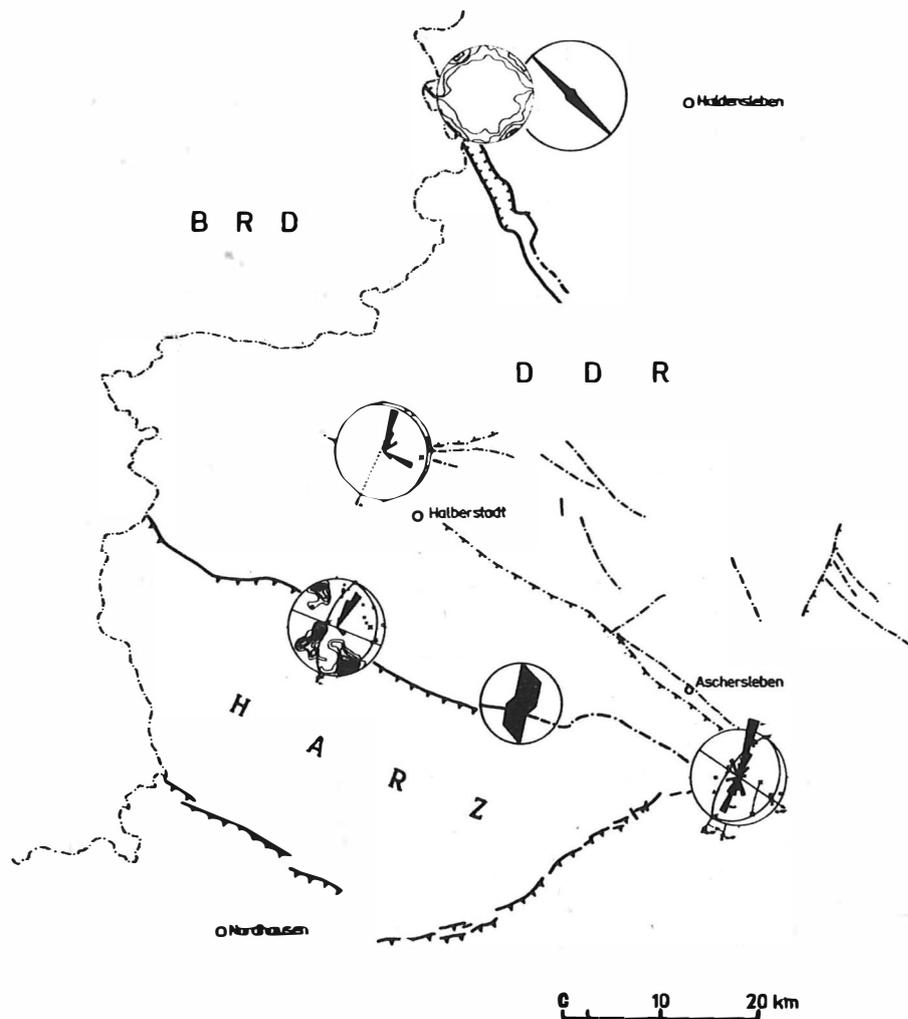


Abb. 22 Geschwindigkeitsanisotropie und Kleintektonik im Bereich der Subherzyna Senke

Zusammenfassung und Interpretation

Sämtliche beobachteten H.-Stylolithen, Sigmoidalklüfte und Primärklüfte sind prädislokativ entstanden, während Querdehnungsklüfte, Bewegungsspuren (Rillung, Auf- und Überschiebungsbahnen) und Geschwindigkeitsanisotropien im Zusammenhang mit der Dislokation in der Oberkreide gesehen werden.

Die räumliche Verteilung der H.-Stylolithen wird durch das Deformationsgefüge in den Aufschlüssen modifiziert. Nur in Verbindung mit der Interpretation weiterer tektonischer Elemente sind gesicherte Aussagen zur Rekonstruktion der Paläospannungsverteilung möglich (vgl. FRIEDEL 1985). Unter diesem Vorbehalt ist die Dominanz der rheinischen Richtung in der H.-Stylolithenverteilung als Ausdruck der Fortsetzung der rheinisch streichenden Zone aus der Thüringischen in die Subherzynes Senke hinein zu sehen (Anlage 4/Abb. 23), d.h., die Wirkung der rhenotypen Strukturzonen auf die Paläospannungsverteilung ist auch für die Subherzynes Senke bestimmend.

Die Resultate der Anisotropieuntersuchung an Proben aus der Oberkreide sowie die Kluftaufnahmen (Querdehnungsklüfte) bestätigen die H.-Stylolithenmessungen (Plänerkalke) von HOSSEINIDUST (1980).

3.3.2. Oschersleben-Bernburger Scholle

Die NW-SE streichende Leistenscholle im Zentrum der Subherzynen Senke wird im Südwesten durch die Halberstädter Störungszone und im Nordosten durch die Allertal-Störungszone begrenzt (Anlage 1).

Die im Gebiet dieser Scholle untersuchten Strukturen (Huy, Hakel u.a.) werden als Typusgebiete für salinare Antiklinalstrukturen betrachtet. Das bedeutet, es soll geprüft werden, inwieweit sich die Paläospannungsverteilung im Gebiet dieser Strukturen von der im Bereich ungestörter Schollen und bedeutender Störungszonen unterscheidet. Weiterhin stand die Frage nach den Unterschieden in der Paläospannungsverteilung zwischen den Wirkungsbereichen der Strukturen innerhalb der Scholle.

3.3.2.1. Huy

Die Huywaldstruktur ist ein langgestrecktes sattelförmiges Gewölbe, das im Scheitel der Struktur aufgerissen ist (Anlage 1). Die Südflanke ist bei der Aufbeulung stärker als der Nordflügel emporbewegt worden (JUBITZ in v. BUBNOFF u.a. 1957). Kleintektonische Untersuchungen von JUBITZ belegen in dem durch Wölbungsbeanspruchung entstandenen Scheitelschollenfeld Elemente der Dehnungstektonik. Weiterhin wird vom gleichen Autor aber auch auf Überschiebungen als ein Wechsel von Dehnungs- und Pressungsformen hingewiesen. Nach JUBITZ (1957) wurde die Struktur präobereozän angelegt.

Die Verteilung der H.-Stylolithen konnte in 4 Aufschlüssen des Unteren Muschelkalks an der Südflanke des Sattels bestimmt werden.

Alle Diagramme zeigen eine gute Übereinstimmung in der Orientierung der gemessenen Druckspannungsindikationen, wobei aber Unterschiede in der Besetzungsdichte der jeweiligen Richtungen auftreten. Im einzelnen ergeben die Messungen folgendes Bild (Abb. 21, 24):

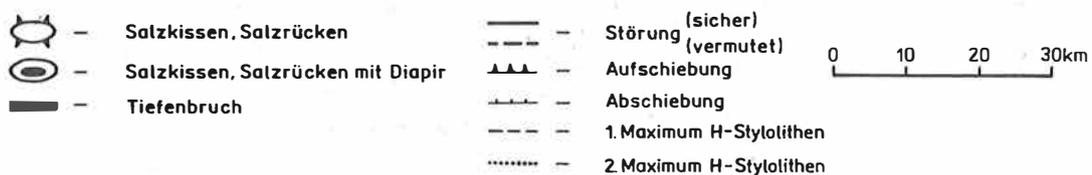
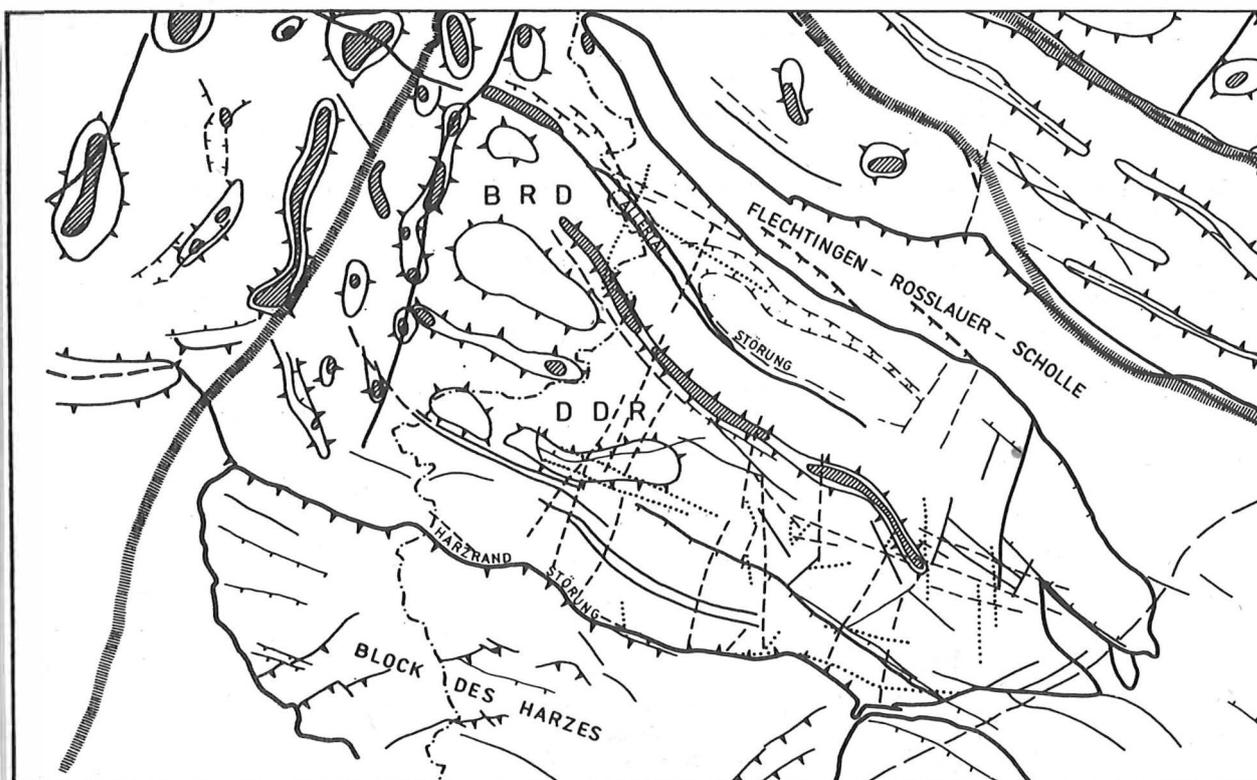


Abb. 23 Störungstektonik und H.-Stylolithenmaxima im Bereich der Subherzynen Senke

- Rheinisch streichende H.-Stylolithen bilden in allen Aufschlüssen das Hauptmaximum.
- Die erzgebirgische Richtung ist nicht von der rheinischen zu trennen.
- Herzynische Indikationen, die gleichfalls in allen Aufschlüssen gemessen wurden, bilden nach der rheinischen Richtung die stärksten Maxira.
- Eggisch streichende H.-Stylolithen wurden nicht beobachtet.

Detailaufnahmen zur Beschreibung der Morphologie und Geometrie der H.-Stylolithen erfolgten in 2 Aufschlüssen.

Huy-Neinstedt: - Kegelförmige H.-Stylolithen, Zapfenlänge 1-3 mm, engständig.
 - Zapfen sitzen z.T. spitzwinklig auf Stylolithenfläche, Übergang zur Harnischrillung.
 - Rheinische H.-Stylolithenzapfen länger als herzynische.
 - Ansatz von H.-Stylolithen aus Sigmoidalklüftung heraus.

Hardelsberg: - Kegelförmige H.-Stylolithenzapfen, Zapfenlänge 1-4 mm, Zapfen sehr dünn und engständig.

Sigmoidalklüfte (4 Aufschlüsse) streichen einheitlich N-S und fallen nach Westen ein (Abb. 21).

Insgesamt stimmt die herzynische H.-Stylolithenrichtung sehr gut mit dem Verlauf der Scheitelstörung des Huywaldes überein (Abb. 24), während die rheinischen Indikationen den überregionalen Strukturachsen folgen (Anlage 5, Abb. 23).

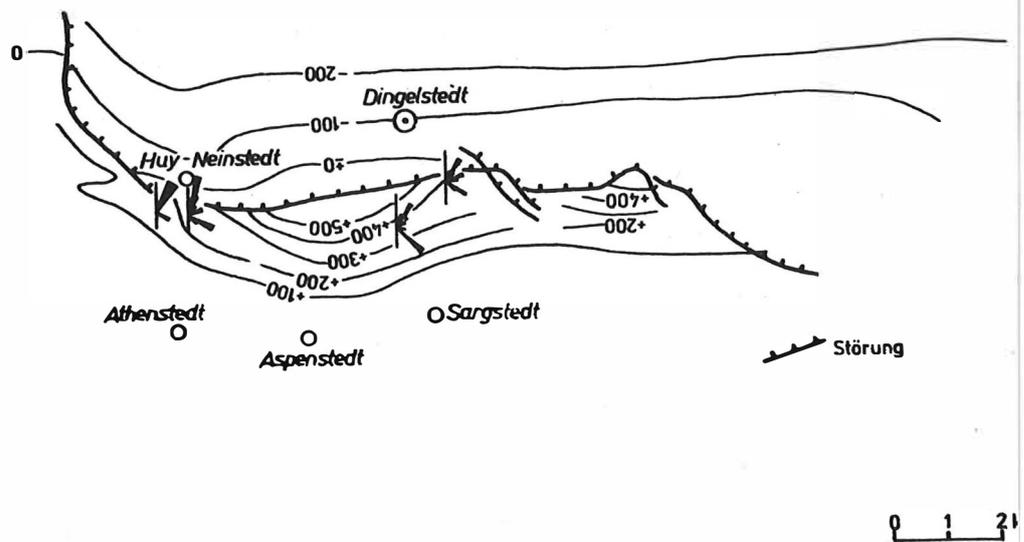


Abb. 24 Orientierung der H.-Stylolithen, bezogen auf die Strukturierung des Huys

3.3.2.2. Hakel (Anlage 1)

Der Hakel, eine breite Muschelkalkaufwölbung, ist die Fortsetzung des Ascherslebener Sattels nach Nordwesten (WAGENBRETH 1966). Kennzeichnend ist das unterschiedliche Einfallen seiner Flanken (HINZ 1957). Die älteste auftretende Formation ist der Buntsandstein, während der Untere Muschelkalk die eigentliche Hochflanke bildet (DUCKSTEIN 1944). Die bedeutendste Störung ist die Hakel-Hauptstörung, eine 6 km lange Verwerfung, die von Schadeleben bis an den Nordwestrand des Hakelforstes zu verfolgen ist (HINZ 1957).

Die Aufnahmen der H.-Stylolithen erfolgten in 5 Aufschlüssen des Unteren (2) und des Oberen Muschelkalks (3). Die Verteilungsbilder der Indikationen sind sehr unterschiedlich (Abb. 21, 25):

- Die rheinische Richtung wurde in allen Aufschlüssen gemessen, bildet aber nur in 2 Diagrammen das Hauptmaximum. Sie ist gleichzeitig die am straffsten geregelte Richtungsgruppe.
- Druckspannungsindikationen in der erzgebirgischen Richtung sind gegenüber den anderen Richtungsgruppen deutlich in der Unterzahl.
- Die herzynisch streichenden H.-Stylolithen wurden in etwa gleicher Intensität beobachtet wie die rheinischen Indikationen. Die flachherzynische Richtung bildet im Aufschluß nördlich von Kochstedt das Hauptmaximum, während die steilherzynisch streichenden H.-Stylolithen im Aufschluß Hakeborn allein und im Aufschluß Kroppenstedt zusammen mit Indikationen der rheinischen Richtung dominieren.
- Die eggische Richtung tritt insgesamt stark zurück und bildet nur im Aufschluß Hakeborn ein 2. Maximum.

Werden die Richtungsmaxima der H.-Stylolithenverteilung (Abb. 21) auf die Strukturierung des Hakels bezogen (Abb. 25), so ergeben sich ähnliche Aussagen wie im Bereich der Huywaldstruktur. Die herzynischen Maxima verlaufen in etwa parallel zu den lokalen Strukturachsen, während die rheinischen Indikationen wiederum im Zusammenhang mit der überregionalen Paläospannungsverteilung gesehen werden.

3.3.2.3. Bernburger Sattel

Der Bernburger Sattel (Anlage 1) ist eine im Zentralteil der Oschersleben-Bernburger Scholle gelegene lokale Salinarstruktur mit E-W streichender Sattelachse.

H.-Stylolithenmessungen erfolgten in 2 Aufschlüssen des Unteren Muschelkalks und in einem Aufschluß des Oberen Buntsandsteins (Rogenstein). Kennzeichnend für alle Aufschlüsse ist eine hohe Übereinstimmung der Verteilungsbilder der H.-Stylolithen (Abb. 21):

- Rheinisch und erzgebirgisch streichende H.-Stylolithen sind in allen 3 Aufschlüssen ohne Bedeutung.
- Überdeutliche Vorherrschaft der flachherzynisch streichenden H.-Stylolithen in allen Aufschlüssen. Im Rogensteinaufschluß bei Bernburg existiert noch ein weiteres Maximum in der herzynischen Richtung.
- Die eggische Richtungsgruppe ist nur durch wenige H.-Stylolithen in zwei Aufschlüssen belegt.

Detailaufnahmen der H.-Stylolithen wurden in 2 Aufschlüssen durchgeführt:

Bernburg: - Kegelstumpfförmige H.-Stylolithen, Zapfenlänge 3-5 mm, Stylolithenfläche in sich gebogen bei gleichbleibender Zapfenorientierung, Stylolithenfläche bis 50 mm lang.

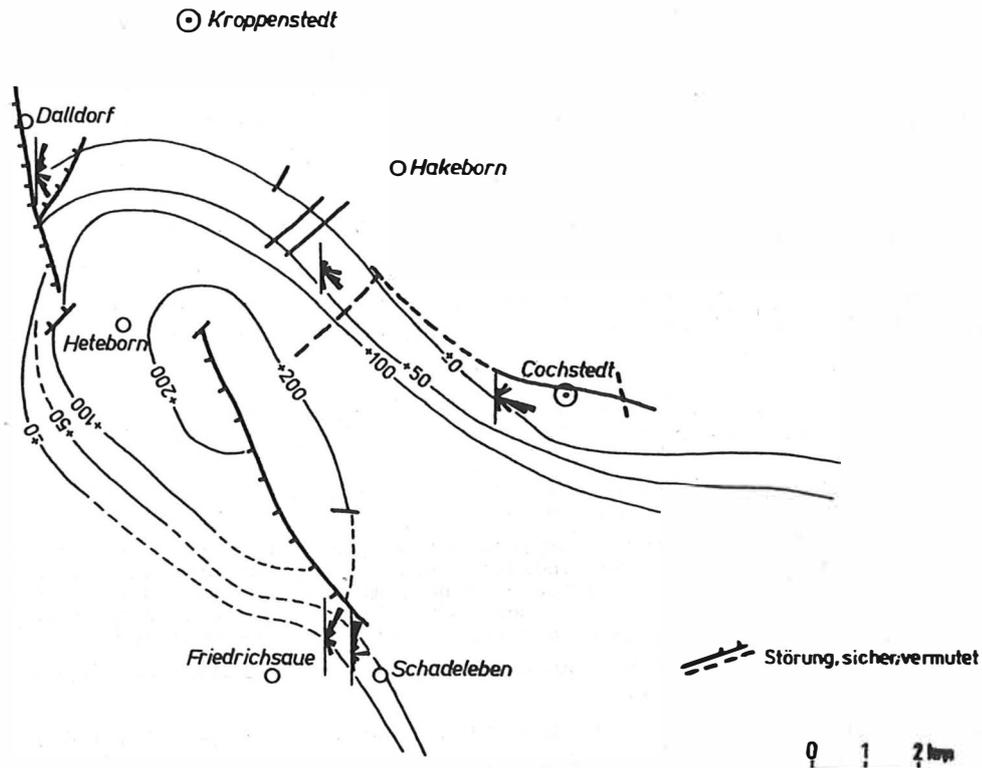


Abb. 25 Orientierung der H.-Stylolithen, bezogen auf die Strukturierung des Hakels (Grundlage: Strukturkarte des Hakels, bezogen auf Grenze Muschelkalk/Röt, n. K. HINZ 1957)

- Kegelförmige H.-Stylolithen, Zapfenlänge 2-3 mm, engständig, Zapfen sitzen spitzwinklig zur Stylolithenfläche.
- Bereiche ausgedehnter Drucklösungsflächen sind miteinander vergittert (Drucklösung sehr weit fortgeschritten)

Nienburg: - Wie in Bernburg weitaushaltende Zonen von Drucklösungsflächen in oolithischen Kalklagen, Zapfenlänge bis 6 mm, engständig.

Die Orientierung der Sigmoidalklüfte ist analog den übrigen Aufschlüssen in der Subherzynen Senke (N-S streichen, Einfallen nach Westen; Anlage 3/Abb. 21).

Zusammenfassung und Interpretation

Greifen wir die zu Beginn dieses Abschnittes (3.3.2.) gestellten Fragen als Ausgangspunkt der Diskussion auf, so wird augenscheinlich, daß sich die rekonstruierte Paläospannungsverteilung in den einzelnen Bereichen der salinaren Antiklinalstrukturen deutlich voneinander unterscheidet (Abb. 21). Die sichtbarsten Unterschiede bestehen zwischen Huy und Hakeborn. Ursache ist aber nicht die durch das Salinar beeinflusste Tektonik, sondern der prähalokinetische Deformationsplan. Das bedeutet, es gibt in der Paläospannungsverteilung keine spezifischen Gemeinsamkeiten der Salinarstrukturen, sondern bestimmend sind auch hier allgemeine Gesetzmäßigkeiten wie sie bereits in der Thüringischen Senke und im Bereich der Harz-Nordrandstörungszone beobachtet wurden.

Die Auswirkungen der jüngeren Salinartektonik (vgl. JUBITZ 1957, HINZ 1957 und WAGENBRETH 1966; u.a.) stehen nicht im Zusammenhang mit der aus der H.-Styrolithenorientierung ermittelten Paläospannungsverteilung.

3.3.3. Allertal-Störungszone

Die herzynisch verlaufende und kompliziert angelegte Allertal-Störungszone (Anlage 1) fungiert als Trennfuge mit Dehnungstendenz (Grabencharakter) zwischen Eichsfeld- und Altmark-Schwelle (BEUTLER 1979). Die strukturelle Entwicklung beider Schollen verläuft ab Unterem Gipskeuper gesondert.

Messungen der H.-Styrolithen erfolgten in 3 Aufschlüssen des Unteren Muschelkalks (Abb. 21):

- Rheinische bis erzgebirgische H.-Styrolithen bilden im Aufschluß Eimersleben (außerhalb der Störungszone) das Hauptmaximum.
- Sämtliche im Flankenbereich der Störungszone aufgenommenen Indikationen streichen herzynisch bis steilherzynisch und zeigen somit eine deutliche Beziehung zum Verlauf der Allertal-Störungszone.

Detailaufnahmen ergeben folgende Aussagen zur Morphologie und Geometrie der H.-Styrolithen im Aufschluß Wälbeck:

- Kegelstumpf- und säulenförmige Styrolithenzapfen, Zapfenlänge 2-3 mm, bogenförmiger Verlauf der Styrolithenfläche unter Beibehaltung der Richtungskonstanz der H.-Styrolithenzapfen (Abb. 28).
- Kegelförmige Styrolithenzapfen, Zapfenlänge 1-2 mm, Zapfen verlaufen z.T. spitzwinklig zur Styrolithenfläche.

Die Sigmoidalklüfte streichen N-S und fallen bis auf 2 Ausnahmen nach Westen ein (Anlage 3).

Kluftaufnahmen auf der umgebenden Weferlinger Triasplatte zeigen Verteilungsbilder wie sie für nicht gestörte Sedimentgebiete typisch sind (Abb. 22). Die auftretenden orthogonalen NNE-SSW (NE-SW) und NW-SE Kluftmaxima sind Ausdruck eines fundamentalen oder primären Kluftsystems im Sinne von BOCK (1980). Eine genetische Bindung dieses regionalen Grundkluftsystems an die Allertal-Störungszone besteht nicht.

Die petrophysikalischen Anisotropieuntersuchungen (Ultraschalluntersuchungen) bestätigen eindrucksvoll die H.-Styrolithenmessungen. Die an 17 Proben aus dem Steinbruch Wälbeck durchgeführten Schallmessungen ergaben bei 12 Proben eine schwache Anisotropie, wobei bei 10 Proben (77 %) ein deutliches Geschwindigkeitsminimum (V_{pmin}) in NW-SE Richtung zu beobachten war. Bei 2 Proben lag das Geschwindigkeitsminimum in E-W bzw. N-S Richtung (Abb. 23).

Zusammenfassend kann für den Bereich der Allertal-Störungszone eine enge Beziehung zwischen den tektonisch/petrophysikalischen Indikationen und dem Verlauf der Allertal-Störungszone konstatiert werden, d.h., die Orientierung der Hauptnormalspannung wird durch die als Schollengrenze fungierende Allertal-Störungszone geschient.

4. Mathematische Modellierung der Spannungsverteilung

Die im Punkt 3 beschriebene Paläospannungsanalyse läßt bei den H.-Stylolithen neben der überregionalen Richtungskonstanz auch einen häufigen Richtungswechsel in Bereichen geologischer Störungszonen erkennen.

Viele Autoren (u.a. HOFFERS 1974, BUCHNER 1978, HOSSEINIDUST 1980) sehen in einem zeitlichen Nacheinander der verschiedenen Richtungen der Hauptnormalspannung (σ_1) die Lösung des Phänomens, wobei aber Widersprüche zum überregionalen Kräfteplan unberücksichtigt bleiben. Im folgenden soll mit Hilfe einer rechnerischen Modellierung gezeigt werden, daß die Richtungsänderung von H.-Stylolithen sich auch aus dem Einfluß von geologischen Störungen auf die Spannungsverteilung erklären läßt. Modellfindung und die anschließende Berechnung der Spannungsverteilung erfolgten durch Koll. Dipl.-Phys. BAUMBACH (ZI für Physik der Erde).

Ausgehend von der Annahme, daß sich H.-Stylolithen in Richtung der Hauptnormalspannung (σ_1) ausbilden, wird ihre Orientierung und ihr Betrag für ein den Bruch umgebendes Punktraster berechnet. Dieser Bruch soll durch eine horizontale Spannung belastet sein. Hierbei wird aufgrund der Lückenhaftigkeit und begrenzten Genauigkeit geologischer Messungen und der im Modell nur in erster Näherung zu erfassenden geologischen Situation Wert nicht auf eine genaue quantitative Erfassung der Spannungsverteilung gelegt, sondern auf eine Abschätzung der qualitativen Änderungen des durch geologische Strukturen hervorgerufenen lokalen Spannungsfeldes.

4.1. Physikalische Voraussetzungen

Die Spannungsverteilung für ein elastisches Medium berechnet sich aus den Gleichgewichtsbedingungen (8) unter Berücksichtigung der Randbedingungen, Verträglichkeitsbedingungen und des HOOK'schen Gesetzes wie folgt:

$$(8) \quad \frac{\delta \sigma_{ik}}{\delta x_k} + \rho g_i = 0$$

σ_{ik} - Spannungstensor
 x_k - Koordinaten
 g_i - Erdbeschleunigung
 ρ - Dichte

Effektiv analytische Methoden zur Lösung von Problemen der Elastizitätstheorie lassen sich mit Hilfe der Theorie der komplexen Variablen finden, wenn es möglich ist, die im allgemeinen 3-dimensionale Aufgabe auf eine 2-dimensionale zurückzuführen.

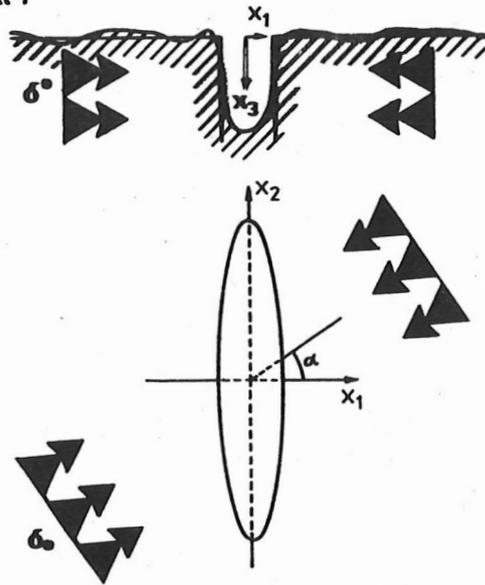
4.2. Modell I

Wir betrachten eine Grabenstruktur (Abb. 26), die einer horizontalen Spannung σ ausgesetzt sein soll. An der Erdoberfläche, die spannungsfrei ist, gilt:

$$(9) \quad \sigma_{33} = \sigma_{13} = \sigma_{23} = 0$$

Es wird angenommen, daß die durch die Massenkraft ρg_i hervorgerufenen inneren Spannungen vernachlässigbar klein im Vergleich zur angelegten Horizontalspannung sind.

Modell 1



Modell 2

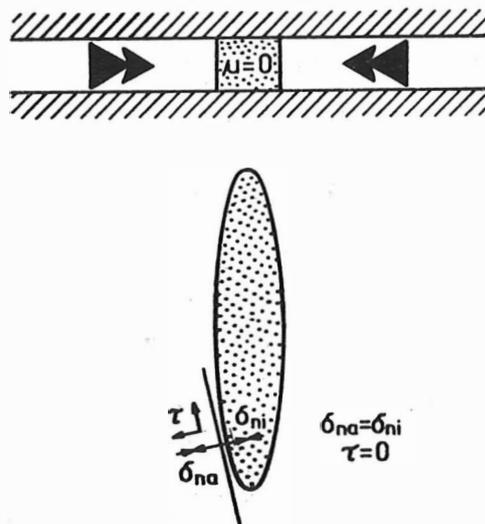


Abb. 26 Theoretische Modelle der Spannungsberechnung

Diese Voraussetzung ist für oberflächennahe Schichten erfüllt, d.h., die Tiefenabhängigkeit ist nicht wirksam.

In erster Näherung werden $\sigma_{33} = \sigma_{13} = \sigma_{23}$ im Medium 0 gesetzt, so daß die Gleichgewichtsbedingungen lauten:

$$(10) \quad \frac{\delta \sigma_{11}}{\delta x_1} + \frac{\delta \sigma_{12}}{\delta x_2} = 0$$

$$\frac{\delta \sigma_{21}}{\delta x_1} + \frac{\delta \sigma_{22}}{\delta x_2} = 0$$

Wir untersuchen somit einen ebenen Spannungszustand, d.h., alle Spannungskomponenten hängen nicht von der Tiefe ab. Als Randbedingung im Unendlichen wird angenommen, daß in Richtung α (siehe Abb. 26) eine Normalspannung σ^0 zusätzlich zu einer hydrostatischen Spannung σ^h wirkt. Als Grabenmodell wird ein elliptischer Hohlzylinder ausgewählt. Da der Grabenrand spannungsfrei sein muß, haben wir als Randbedingungen:

$$(11) \quad \sigma_{ij} n_j = 0$$

$$i, j = 1, 2$$

Davon ausgehend kann man, ohne die genaue Lösung zu kennen, ableiten, daß sich die Hauptnormalspannung bei Annäherung an den Graben parallel zum Grabenrand einregelt, Richtungsänderungen also bis 90° möglich sind.

Die Lösung wird eindeutig durch die Randbedingungen am Grabenrand bestimmt. Starke Einflüsse auf das lokale Spannungsfeld haben Grabenränder mit deutlicher Krümmung. Man müßte also für jede konkrete geologische Situation die Spannungsverteilung berechnen. Da die Aufgabenstellung der rechnerischen Modellierung aber nur die Frage beinhaltet, ob die Abweichungen der Richtung der H.-Stylolithen von der großregionalen Hauptnormalspannungsrichtung durch ein Grabenmodell erklärt werden können, war eine aufwendige, auf lokale Randausbildungen der Gräben bezogene Modellierung, nicht notwendig. Die Anwendung der rechnerischen Modelle erfolgt im Zusammenhang mit der Interpretation der regionalen Ergebnisse im Abschnitt 5.3.3.

4.3. Modell II

Im zweiten Modell wird die Spannungsverteilung um einen tiefer gelegenen geschlossenen Bruch berechnet. Wir nehmen als Bruchform einen elliptischen Zylinder an, der mit Gesteinsmaterial gefüllt sein soll (Abb. 26). Die Scherfestigkeit ist im Innern also deutlich herabgesetzt (der Schermodul μ wird kleiner). Dieser Zustand wird näherungsweise durch eine Flüssigkeit mit $\mu = 0$ modelliert (Übergangsbedingungen: Scherspannung $\tau = 0$, Normalspannung senkrecht zur Bruchfläche = stetig). Die Aufgabe ist 3-dimensional, da hier Auflast und lithostatischer Druck berücksichtigt werden müssen. Nur unter vereinfachten Randbedingungen gelingt es, zu einer ebenen Aufgabe zu kommen. Man nimmt an, daß der Bruch in einem Zwischenraum innerhalb zweier starrer Schichten sich befindet (d.h. die elastischen Parameter sind in den Zwischenräumen deutlich geringer/Abb. 26). Wenn zusätzlich angenommen wird, daß sowohl der lithostatische Druck als auch die unter dem Winkel α einwirkende Spannung in der Zwischenschicht nicht von der Tiefe abhängen, gelangen wir zu einem ebenen Verzerrungszustand, für den die Spannungsverteilung

lung zu berechnen möglich ist. Der Ungenauigkeit dieses Modells entspricht andererseits die Ungenauigkeit mit der Aussagen über die Größe der lithostatischen Spannung und die Tiefenabhängigkeit der zusätzlich wirkenden Spannung σ^0 gemacht werden können. Besonders bei der Bestimmung der Richtung der Hauptnormalspannung spielt die letzte Bemerkung eine wichtige Rolle, da hier keine Linearität vorliegt.

Die Rechnungen lassen den Schluß zu, daß nur in ganz unmittelbarer Nähe des Bruchrandes Richtungsänderungen - allerdings kleineren Betrages als im Modell - zu erwarten sind, die Richtung der H.-Stylolithen also bedeutend weniger von der großregionalen Hauptnormalspannungsrichtung abweicht.

5. Darstellung und Interpretation der regionalen Ergebnisse

5.1. Vorkommen und Ausbildung der Stylolithen und Sigmoidalklüfte

Das Auftreten von Drucklösungserscheinungen kann in fast allen lösungsfähigen Gesteinen beobachtet werden. Besonders in Muschelkalk-, Buntsandstein- und Zechsteinaufschlüssen sind Stylolithen anzutreffen, wobei der Schwerpunkt in Kalksteinen und weniger in mergeligen und sandigen Kalken liegt. Innerhalb des Muschelkalks treten Häufigkeitsmaxima der Stylolithen in kristallinen Kalklagen des Wellenkalks und in Kalkbänken des Oberen Muschelkalks auf. Nur sehr wenige Stylolithen findet man in den Werksteinbänken des Unteren Muschelkalks. Die Ursachen dafür sind neben der frühzeitigen Zementation der Bankzonen, vor allem in dem Fehlen geeigneter Unstetigkeitsflächen (Klüfte, Schichtfugen u.a.) als notwendiges Ausgangsinventar der Stylolithengnese zu sehen. Bezieht man die Anzahl der Stylolithen im Unteren Muschelkalk auf die Lithotypengliederung von KOLB (1976), so ergibt sich eine deutliche Bindung an die Schaumkalke und Dichten Kalke (z.B. Kalksteintagebau Bernburg und Walbeck mit ca. 20 Indikationen pro m²). Die Schaumkalke sind aufgrund ihres bedeutenden Karbonatanteils und ihrer hohen Porosität prädestiniert für Drucklösungsprozesse. Eine geringere Anzahl der Stylolithen ist für die Knauerkalke, Hartgründe, Schillkalke, Wellenkalke, Konglomerate und Dolomite kennzeichnend. Richtungsunterschiede der H.-Stylolithenzapfen in Abhängigkeit von den Bankzonen ergaben sich nicht. So sind z.B. die H.-Stylolithen im Ohmgebirgsgraben und im Dün durch eine hohe Richtungskonstanz charakterisiert, obwohl sie in unterschiedlichen Bankzonen gemessen wurden. Umgekehrt gibt es große Richtungsunterschiede innerhalb einer Bankzone (Hakel, Harz-Nordrandstörung u.a.). Die Richtungsunabhängigkeit von der genauen stratigraphischen Position konnte auch im Vergleich der Zechsteinaufschlüsse mit Buntsandstein- und Muschelkalkvorkommen bestätigt werden (Abb. 27). Im Buntsandstein und Zechstein trifft man die Stylolithen überwiegend in oolithischen Kalksteinen (Rogensteine) des Unteren Buntsandsteins bzw. in den Kalken der Werra- und Straßfurtserie, kaum aber im Plattendolomit an. In kristallinen Kalkpelitlagen des Devons (Schwarzer Marmorbruch bei Rübeland) konnten nach Untersuchungen von FRIEDEL (1985) bis zu 50 Indikationen pro m² beobachtet werden. Entscheidend für die Anzahl der Stylolithen ist in erster Linie die fazielle Ausbildung der Trägergesteine. Es fällt auf, daß in Aufschlüssen mit relativ hohem Dolomitgehalt (z.B. Aufschlüsse des Unteren Muschelkalks im Bereich der Harz-Nordrandstörung) die Stylolithenanzahl relativ gering ist (vgl. Abschnitt 3.3.1.). Besonders deutlich kommt die fazielle Abhängigkeit in den Plänerkalken der Oberkreide zum Ausdruck. Während in den Aufschlüssen im Oberharz und Salzgitterer Sattel (Turon) zahlreiche Stylolithen beobach-

tet wurden (HOSSEINIDUST 1980, OELKE & WEIRICH 1981), führte ein erhöhter Mergelanteil in den Plänerkalken (Genoman) der östlichen Subherzynen Senke und in der Elbezone nicht zur Auslösung derartiger Drucklösungsprozesse. Neben der faziellen Ausbildung der Trägergesteine bestimmt vor allem das Angebot an Unstetigkeitsflächen (Mikrorisse) die Anzahl der H.-Stylolithen. So bedingt die Zunahme von Mikrorissen in Randbereichen von Störungen (Allertalstörungszone, Ohmgebirgsgrabenzone) eine größere Anzahl von Stylolithen (erhöhter Lösungstransport; vgl. auch FRIEDEL 1985).



Abb. 27 Vergleich der H.-Stylolithen aus unterschiedlichen stratigraphischen Horizonten

Keine sicheren Beziehungen gibt es zwischen definierter Ausgangsspannung und Länge der Stylolithenzapfen. Die Ausbildung (Länge) der Stylolithenzapfen ist neben der Spannung noch von zahlreichen anderen Faktoren abhängig (notwendige Lösungsmittel, Lösungstransport, Porosität, Temperatur, Zeit und dem Vorhandensein von Katalysatoren u.a.). Die größten Stylolithenzapfen (V-Stylolithen) wurden in den Rogensteinen des Buntsandsteins beobachtet (hohe Porosität ermöglicht verstärkten Lösungstransport). Zapfenlängen bis zu 50 mm sind keine Seltenheit. In den Muschelkalkaufschlüssen schwankt die Zapfenlänge zwischen 1 und 5 mm, wobei auch längere Zapfen (bis 10 mm) gemessen wurden. Vereinzelt Beobachtungen ergaben den Hinweis, daß bei der Existenz rheinisch und herzynisch streichender H.-Stylolithen im gleichen Lithotyp die rheinischen Indikationen deutlich markanter ausgebildet sind.

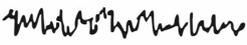
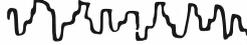
Sigmoidalklüfte sind in den Wellenkalkfolgen des Unteren Muschelkalks vorhanden. Es sind in der Regel nur die kristallinen Bänke innerhalb des Wellenkalks von der Sigmoidalklüftung betroffen, deren Mächtigkeit 30 bis 80 mm nicht übersteigt. Auf eine detaillierte Beschreibung der Sigmoidalklüfte wird verzichtet, da die Geländebeobachtungen gezeigt haben, daß das Erscheinungsbild nicht von dem abweicht, wie es für den Muschelkalk schon von LOTZE (1932), ENGELS (1956), FIEDLER (1965), KRUCK (1974) und KURZE (1981) beschrieben wurde.

5.2. Morphologie und Geometrie der H.-Stylolithen

Die Beschreibung der Morphologie und Geometrie der H.-Stylolithen erfolgt auf der Grundlage der Klassifikation von TRURNIT (1967). Von den von TRURNIT ausgehaltenen 17 Klassen der Drucklösungskontakte wurden im Rahmen der Untersuchungen überwiegend kegelförmige (Stylolithenflächen 1. Art 1. Ordnung) und kegelstumpfförmige (Stylolithenflächen 2. und 3. Art) Indikationen beobachtet (Abb. 28 a-d).

Die Kombination verschiedener Drucklösungsflächen (Abb. 28 e) sowie unterschiedliche Stylolithenformen im Handstückbereich (Abb. 28 f) kommen gleichfalls häufig vor. Beide Formen lassen entweder auf eine mehr- (zwei)malige Aktivierung der Drucklösungsprozesse in einer Richtung oder aber auf unterschiedliche Drucklösungsbedingungen und damit auf differenzierte Ausbildung der H.-Stylolithen schließen.

Stylolithen 1. bis 3. Art nach TRURNIT (1967)

- | | | |
|----|---|---|
| a) |  | "normale", kegelförmige Stylolithen
(1. Art; 1. Ordnung) |
| b) |  | kegelstumpfförmige Stylolithen
(1. Art; 2. Ordnung) |
| c) |  | kegelstumpf- und säulenförmige Stylolithen mit
parallelen Seitenflächen (2. Art) |
| d) |  | Drucklösung setzt am Kegelsende des Stylolithen
fort (3. Art) |
| e) |  | Kombination verschiedener Drucklösungsflächen (un-
differenzierte glatte Drucklösungsfläche mit kegel-
und kegelstumpfförmigen Stylolithen) |

- f)  kegelförmige u. kegelstumpfförmige Stylolithen im Handstückbereich
- g)  Drucklösung setzt am Kegelende fort, bei Richtungsänderung der Zapfenachse
- h)  unterschiedliche H.-Stylolithenrichtungen auf einer Stylolithenfläche (sehr selten)
- i)  bogenförmiger Verlauf der Stylolithenfläche bei Richtungskonstanz der Zapfen

Abb. 28 Geometrie der H.-Stylolithenzapfen

Darüber hinaus wurden in einigen wenigen Aufschlüssen H.-Stylolithen gemessen, bei denen eine Richtungsänderung an der Spitze der Zapfenachse festgestellt wurde (Abb. 28 g). Die Ursachen dafür können sein:

- Auslenkung der Zapfenrichtung an einer im Gestein vorhandenen Inhomogenität (u.a. relativ unlösliche Gesteinspartikel);
- Richtungsänderung der maximalen Hauptnormalspannung bei erneuter Aktivierung der Drucklösungsprozesse.

Auch bei den Beobachtungen von unterschiedlichen H.-Stylolithenrichtungen auf einer Stylolithenfläche (Abb. 28 h) muß entweder von einer Auslenkung der Zapfenrichtung (a) oder von einer σ_1 -Richtungsänderung bei erneutem Einsetzen der Drucklösungsprozesse (b) ausgegangen werden. Da diese Feststellungen nur sehr selten gemacht wurden, wird die Möglichkeit a) vom Verfasser für wahrscheinlicher gehalten.

Eine weitere, oft beobachtete Form ist der bogenförmige Verlauf der Stylolithenfläche unter Beibehaltung der Zapfenorientierung (Abb. 28 i), wobei die Länge der Zapfen erheblich schwanken kann. Stylolithenzapfen, an deren Kegelende die Drucklösung fortsetzt (Abb. 28 j), zeigen in sich geschlossene Formen (innerhalb der Zapfen), die wiederum den kegelförmigen, kegelstumpfförmigen oder säulenförmigen H.-Stylolithen entsprechen. Das bedeutet, daß unabhängig von der Dimension die gleichen Erscheinungen zu beobachten sind.

Die Achsen der Stylolithen können alle erdenklichen Winkel zur Drucklösungsfläche (Stylolithenfläche) einnehmen (TRURNIT 1969). Stylolithen mit schräg zur Stylolithenfläche verlaufenden Stylolithenachse konnten in einer Vielzahl von Aufschlüssen beobachtet werden. Im angelsächsischen Sprachraum wird diese Form als "Slickolites" (Slickenside = Harnisch; Stylolite = Stylolith) bezeichnet (TRURNIT). WAGNER (1964) spricht von "Schrägstylolithen" oder "Nadelharnischen". ARTHAUD und MATTAUER (1969) weisen darauf hin, daß sich die Form der Stylolithenzapfen im Verlauf der Verkleinerung des Winkels zwischen Zapfenachse und Stylolithenfläche ändert. In Abhängigkeit von der Größe des Winkels zwischen Richtung der maximalen Hauptnormalspannung und Unstetigkeitsfläche (Kluft, Mikroriß u.a.) bilden sich (Abb. 29):

- kegelförmige und kegelstumpfförmige Stylolithen ("Stylolithen im eigentlichen Sinne") - Stylolithenachse senkrecht zur Stylolithenfläche (Abb. 29 a);
- "Schrägstylolithen" - Stylolithenachse schräg zur Stylolithenfläche (Abb. 29 b);

- c) "Slickolites" oder "Nadelharnische" - Winkel zwischen Stylolithenachse und Stylolithenfläche geht gegen Null (Abb. 29 c);
- d) Verwerfung mit Harnischbildung - Winkel zwischen Stylolithenachse und Stylolithenfläche ist Null (Abb. 29 d).

Neben den hier vorgestellten Beispielen gibt es noch eine Anzahl von Übergangsformen, wobei grundsätzlich für alle gilt: Entscheidend für die Ausbildung der einen oder der anderen Form ist jeweils die Lage der Unstetigkeitsfläche im Spannungsplan und die bereits im Punkt 5.1. genannten Faktoren (p-t Bedingungen, Lösungstransport u.a.). Aus Geländebeobachtungen und aus Literaturangaben (ARTHAUD und MATTAUER 1969) wird deutlich, daß sich die beschriebenen Formen (Abb. 29 a-d) zeitgleich bilden können, wobei aber auch ein zeitliches Nacheinander, wie in den Muschelkalkaufschlüssen der saxonischen Störungszonen rekonstruiert werden konnte. Sämtliche in den Bereichen der Störungszonen von verschiedenen Bearbeitern (FRANZKE & JANSSEN 1984, HOSSEINIDUST 1980, KURZE & NECKE 1979) gemessenen H.-Stylolithen wurden bei der Heraushebung der Schichten mitaufgerichtet und folglich sind sie älter als die mit der Deformation (Steilstellung und Überpressung) im Zusammenhang stehenden Mehrzahl der Harnische (vgl. Abschnitt 5.4.1.). Nach Meinung des Verfassers waren zur Zeit der Heraushebungs- und Überschiebungsphase die physikochemischen Voraussetzungen zur Stylolithenbildung in den Muschelkalkkarbonaten schon zu ungünstig (Lithifikation der Karbonate war bereits abgeschlossen, fehlende Porosität u.a.) als daß sich noch eine größere Anzahl von Stylolithen hätte bilden können (vgl. Abschnitt 5.4.1.).

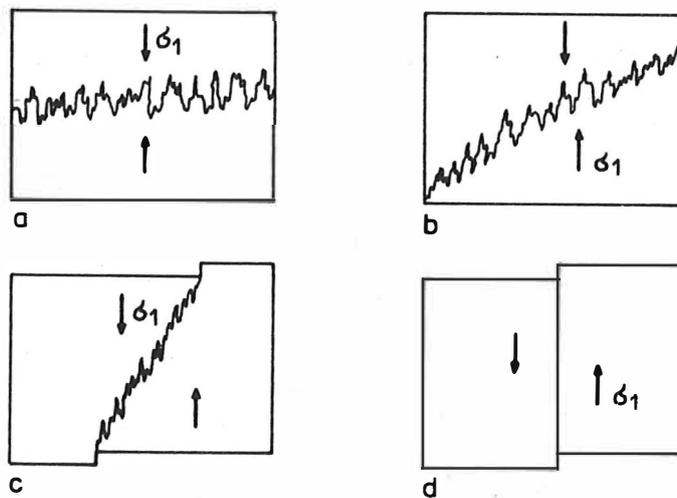


Abb. 29 σ_1 -Richtung und Entstehung von H.-Stylolithen
(nach G.H. WAGNER 1964)

5.3. Die räumliche Entwicklung der Paläospannungsverteilung unter Berücksichtigung der mathematischen Modellierung

5.3.1. Allgemeine Aussagen

Die auf der Grundlage der gemessenen Indikationen (H.-Styloolithen, Klüfte, Bewegungsspuren, petrophysikalische Anisotropien) gewonnenen Ergebnisse werden im folgenden verallgemeinert und einer Wertung unterzogen.

Für die H.-Styloolithenzapfen, die in ca. 170 Aufschlüssen gemessen wurden, ergeben sich folgende Hauptrichtungen (Anlage 2):

- Die rheinische Richtungsgruppe wurde in fast allen Aufschlüssen gemessen und bildet in den meisten Diagrammen das Hauptmaximum. In einigen Gebieten (Allertal-Störungszone, Bernburger Sattel u.a.) bleibt sie deutlich hinter dem herzynischen Maximum zurück.
- Die erzgebirgische Richtung bildet häufig zusammenhängende Maxima mit den rheinischen H.-Styloolithen. Sie tritt gegenüber der rheinischen Richtungsgruppe stark zurück.
- Herzynisch streichende H.-Styloolithen bilden nach der rheinischen Richtungsgruppe die stärksten Maxima. In einigen Gebieten (Dün, Hainleite) fehlen sie fast völlig.
- Der eggischen Richtung kommt nur eine untergeordnete Bedeutung zu, sie dominiert aber bei Kamsdorf/Thüringen, im Zechstein und in einigen wenigen Aufschlüssen in der Thüringischen Senke.

Insgesamt zeichnet sich regional eine sehr unterschiedliche Verteilung der H.-Styloolithen ab (vgl. Abschnitte 5.3.2. und 5.3.3.).

Die Sigmoidalklüfte streichen in der Mehrzahl der untersuchten Aufschlüsse zwischen $165-190^{\circ}$ und fallen generell nach Westen ein. Vereinzelt treten E-W streichende und nach Norden einfallende Sigmoidalklüfte auf (Anlage 3). Die Ursachen der Richtungskonstanz und der Entstehung der Sigmoidalklüfte werden in der Literatur sehr kontrovers diskutiert (vgl. Abschnitt 2.3.1.).

Eine Beurteilung der unterschiedlichen Meinungen unter Berücksichtigung der durchgeführten Untersuchungen läßt folgende Bewertung zu:

- a) Die Richtungskonstanz im Streichen und Fallen spricht für die großregionale bis globale Anlage der Sigmoidalklüfte.
- b) Dabei handelt es sich nach Meinung des Verfassers um die komplexe Wirkung diagenetischer und tektonischer Vorgänge. Ausgangspunkt ist die Bildung von frühdigenetischen Klüften bei gleichzeitiger Verbiegung der Segmente infolge der Auflast (SCHWARZ 1970). Das konstante Einfallen nach Westen kann an globale tektonische Kräfte gebunden sein, deren Entstehung in der Corioliskraft der Erdrotation zu suchen ist (KURZE 1981).

Bei den petrophysikalischen Untersuchungen lassen die orientierten Proben aus dem Unteren Muschelkalk eine Geschwindigkeitsanisotropie erkennen. Die Richtung der Anisotropie läßt sich in den Strukturbereichen sehr gut mit der H.-Styloolithenorientierung korrelieren. Von den 197 Proben entfallen 18 aufgrund unzureichender Meßwerte bzw. fehlender Orientierung. Bei den verbleibenden 179 Proben schwankt der Anisotropiefaktor K im Bereich von 1,0 bis 1,3. Es ergibt sich:

1,00	K	1,02	40 Proben (23 %)
1,02	K	1,04	69 Proben (38 %)
1,04	K	1,06	29 Proben (15 %)
1,06	K	1,08	15 Proben (8 %)
1,08	K	1,10	14 Proben (8 %)
1,10	K		13 Proben (7 %)

Die Mehrzahl der gemessenen Anisotropien ist nur sehr schwach ausgebildet, d.h., ein Großteil der Ergebnisse liegt noch unmittelbar in oder an der Fehlergrenze. Besonders klein ist der Anisotropiefaktor bei den Proben aus Deuna (Dün) und Rüdersdorf. Eine Interpretation der statistisch nicht gesicherten Ergebnisse kann nur unter Min- beziehung in die Gesamtuntersuchungsmethodik erfolgen.

Ergänzende kleintektonische Untersuchungen konzentrierten sich im wesentlichen auf ausgewählte Bereiche ruptueller Deformationen (Harz-Nordrandstörungszone u.a.). Ziel der Untersuchungen war es, Aussagen zur zeitlichen Stellung der H.-Stylolithen im tektonischen Gesamt Ablauf der Deckgebirgsentwicklung zu ermöglichen (vgl. Abschnitt 5.4.1.). Darüber hinaus sollten Detailaufnahmen Hinweise zur räumlichen Verteilung der H.-Stylolithen im Vergleich zum aufgenommenen Gefügeinventar (Klüfte, Wellen- streifen, Bewegungsspuren u.a.) liefern und somit die Rekonstruktion der Paläospan- nungsverteilung stützen (Abb. 30 und 31).

In den tektonisch ungestörten Schollenbereichen sind die Mehrzahl der hier auf genommenen primären oder fundamentalen Klüfte (Abb. 32) streng zeitlich gesehen vermutlich älter als die H.-Stylolithen, obwohl sie vom Deformationsablauf als syngenetisch betrachtet werden können (vgl. FRIEDEL 1985). Nach BOCK (1980) sind die fundamentalen Klüfte Ausdruck einer senkrecht zu den Schichtflächen orientierten maximalen Hauptnormalspannung. Auffallend auch hier eine deutliche Übereinstimmung der Orientierung der H.-Stylolithen zu den Richtungen des fundamentalen Kluft- systems (Abb. 33), wobei diese Klüfte in der Regel als Ausgangspunkt der Stylolithen- bildung angesehen werden.

Ähnlich wie die Mikrorisse streichen auch die Wellenstreifen häufig parallel zu den H.-Stylolithenzapfen (Abb. 34; vgl. KURZE 1981, FRIEDEL 1985). Der Schnitt von Wellenstreifen mit Klüften führt zur lokalen Auslenkung der Zapfenrichtung (Abb. 35). Aussagen zur zeitlichen Stellung der beschriebenen Indikationen erfolgen im Abschnitt 5.4.1. An dieser Stelle sei lediglich vermerkt, daß die räumliche Verteilung der In- dikationen - trotz zeitlichen Hiatus der Bildungsräume - für einen gleichartig orien- tierten Deformationsplan spricht.

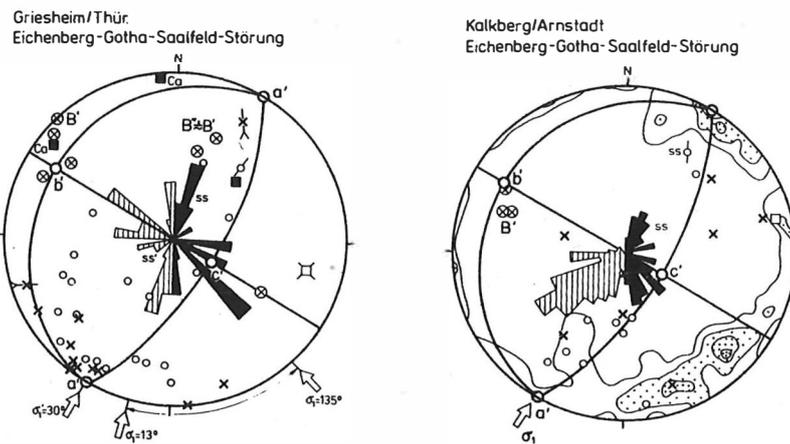


Abb. 30 H.-Stylolithen und weitere kleintektonische Deformationselemente in Bereich der Eichenberg-Gotha-Saalfelder Störungzone (nach FRANZKE & JANSSEN 1984) - Legende vgl. Anlage 7

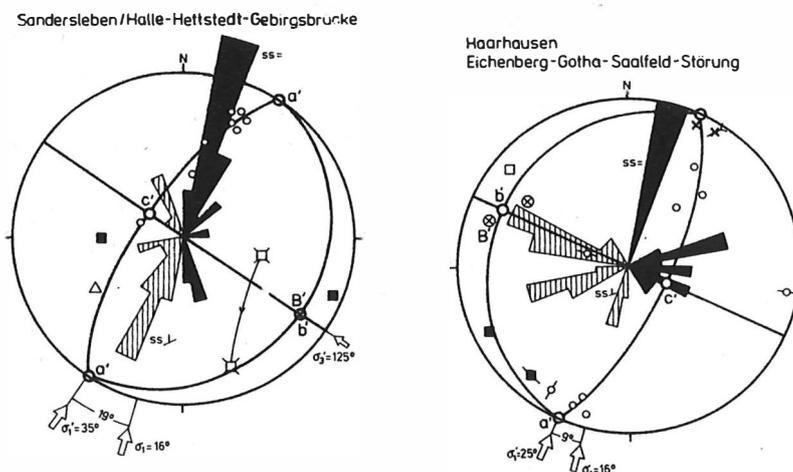


Abb. 31 H.-Stylolithen u. weitere kleintektonische Deformationselemente in ausgewählten Aufschlüssen (nach FRANZKE & JANSSEN 1984) - Legende vgl. Anlage 7

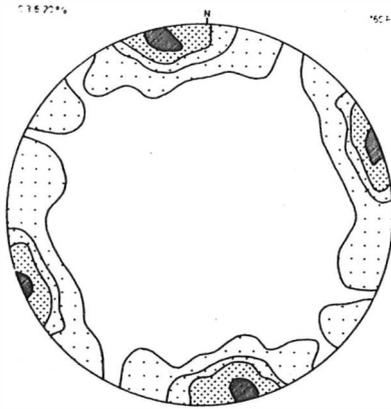


Abb. Steinbruch „Springberg“ bei Beudorf, unterer Muschelkalk

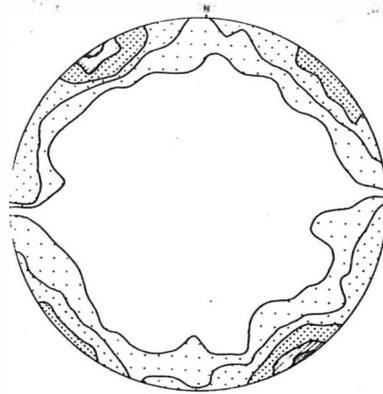


Abb. Steinbruch „Springberg“ bei Beudorf, unterer Muschelkalk

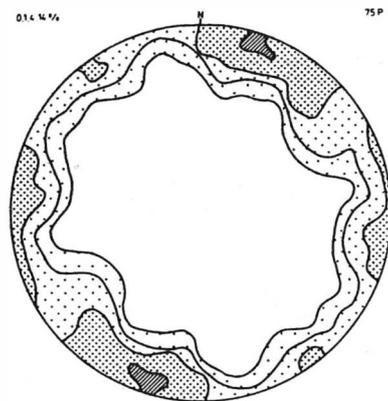


Abb. Steinbruch „Springberg“, Allersgraben, unterer Muschelkalk

Abb. 32 Kluftdiagramme aus ungestörten Schollenbereichen

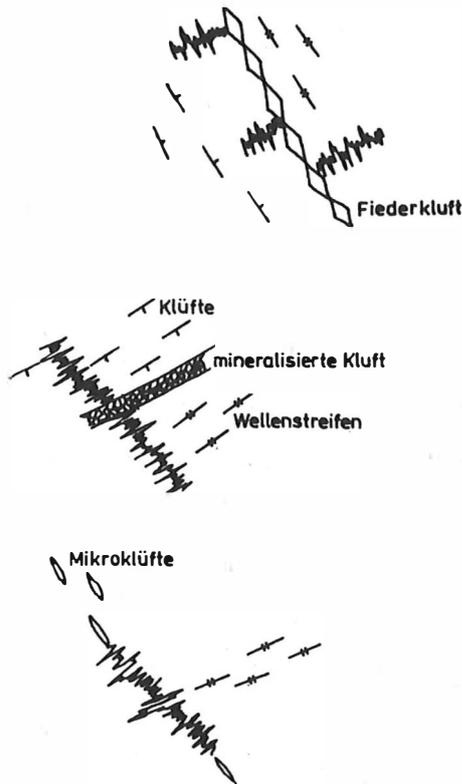


Abb. 33, 34, 35 Detailaufnahmen von H.-Stylolithen, Klüfte und Wellenstreifen

5.3.2. Beziehungen zum großregionalen Strukturbaue

Die Darstellung der 1. und 2. Maxima (Anlage 4) der H.-Stylolithen und speziell der Vergleich der Hauptrichtungen (1. Maximum) mit den Mächtigkeitsgradienten der Terebratelzone läßt eine deutliche Zonierung der rheinisch streichenden H.-Stylolithen aussehend von der Südthüringisch-Fränkischen Scholle bis zur Allertal-Störungszone erkennen (Anlage 5). Die immer wieder durchschlagende rheinische Richtungsgruppe bildet 3 bestimmende rhenotype Strukturachsen, die eine enge Bindung an den großregionalen Strukturplan aufweisen. Besonders deutlich ist die Vorherrschaft der rheinischen Richtung in der Ostrhön und im westlichen Teil der Thüringischen Senke (Strukturachse A, Abb. 36), also in Gebieten, die im Vorfeld der rheinischen Mittelmeer-Mjösenszone gelegen sind (vgl. auch FRANZKE & JANSSEN 1984).

Eine weitere rheinische Achse (B) fällt regional mit der bereits erwähnten Geranustrut-Zone zusammen. Kennzeichnend für beide rhenotypen Strukturachsen ist ihre überregionale Richtungskonstanz, unbeeinflußt von Schollengrenzen und Störungszonen. Die dritte rheinische bis erzgebirgisch streichende Zone (C) im Ostteil der Thüringischen Senke tritt - wahrscheinlich aufgrund der schlechteren Aufschlußverhältnisse - nicht so deutlich in Erscheinung. Ihre Fortsetzung in die Subherzyne Senke kann mangels fehlender Aufschlüsse nicht überprüft werden. Eine Bindung an erzgebirgisch ver-

laufende Mächtigungsgradienten der Terebratelzone ist nur zum Teil feststellbar. Die Richtungskonstanz der rheinischen Indikationen wurde auch in Arbeiten, die sich regional auf die Süddeutsche Großscholle konzentrierten, beschrieben (u.a. WAGNER 1964, ILLIES 1974, PLESSMANN 1972, BUCHNER 1978). Die herzynischen und eggischen Maxima lassen dagegen keine derartigen Bindungen zu den synsedimentären Strukturachsen erkennen.

5.3.3. Beziehungen zu lokalen und regionalen Störungen

Neben der überregionalen Richtungskonstanz modifizieren regionale und lokale Strukturen die H.-Stylolithenverteilung und ihre Häufigkeit, d.h., die NW-SE streichenden Maxima folgen dem Verlauf der herzynischen Störungszonen (Anlage 4, 5, Abb. 36). Hinzu kommt eine Beeinflussung der Stylolithenrichtungen durch das in vielen Aufschlüssen (besonders in Störungszonen) vorhandene Deformationsgefüge. Besonders deutlich wird das in der Subherzynen Senke im Bereich der Harznordrand-Störungzone und der Allertal-Störungzone.

So kann am Beispiel der Allertal-Störungzone mit Hilfe der Modell-Theorie (vgl. Abschnitt 4) eine Modifizierung der Spannungsverteilung aufgezeigt werden. Von den beiden möglichen Modellen wird aufgrund des postulierten Bildungszeitraumes der H.-Stylolithen (vgl. 5.4.1. / frühes Stadium der Grabenbildung) das Modell I ausgewählt (vgl. Abschnitt 4.2.). Eine herzynisch orientierte Hauptnormalspannung bewirkt, wie die Berechnungen zeigen, bei einem Winkel zur Störungsachse von 30° nur eine schwache Auslenkung der σ_1 -Richtung in der Umgebung der Grabenstörung (Abb. 37). Die rheinischen H.-Stylolithen in einiger Entfernung zur Störung passen sich also nicht in das theoretische Bild der Spannungsverteilung ein. Anders hingegen wenn wir von einer rheinischen Hauptnormalspannung (σ_1) ausgehen. Hier kommt es im unmittelbaren Störungsbereich zur Anpassung von σ_1 an den Störungsverlauf, während in einiger Entfernung zur Störung die rheinische Richtung dominiert (Abb. 38). Das bedeutet, es besteht große Übereinstimmung zwischen dem theoretischen Modell der Spannungsverteilung und den durch Felduntersuchungen ermittelten H.-Stylolithenrichtungen (Abb. 39).

Dieses Beispiel verdeutlicht, daß zur Erklärung der Richtungsvielfalt der H.-Stylolithen nicht unbedingt ein globaler Richtungswechsel der maximalen Hauptnormalspannung herangezogen werden muß, sondern daß lokale und regionale Störungszonen eine räumlich begrenzte Richtungsänderung der Hauptnormalspannung bewirken können.

Der Nachweis der lokalen Spannungsänderung im Wirkungsbereich von Störungszonen kann auch helfen, in der Literatur diskutierte offene Fragestellungen zu klären. So ergaben H.-Stylolithenmessungen in Oberkreide- und Muschelkalkaufschlüssen im Gebiet des in der subherzynen oder laramischen Phase entstandenen Salzgitterer Sattels deutliche Maxima in herzynischer Richtung, d.h. mehr oder weniger parallel zum Streichen des Salzgitterer Sattels (OELKE & WEIRICH 1981). Weiterhin führen die beiden Autoren an:

"Wenn man davon ausgeht, daß H.-Stylolithen sich parallel zur Hauptdruckrichtung ausbilden, müßte während der subherzynen Phase die Hauptdruckrichtung in herzynischer Richtung gelegen haben. Dies widerspricht jedoch allen Erkenntnissen, die in jahrzehntelanger Arbeit im Saxonikum gewonnen wurden."

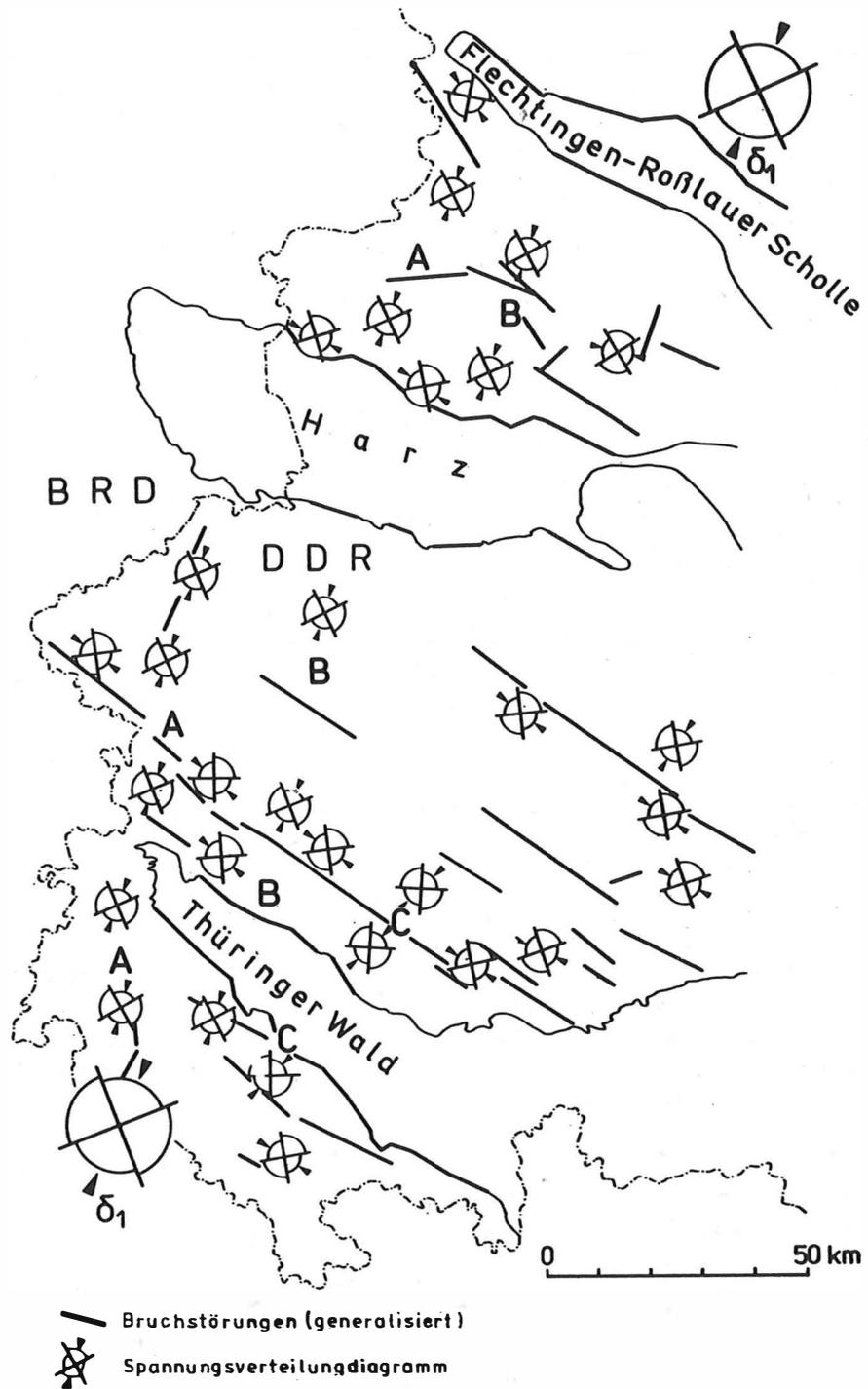


Abb. 36 Überregionale und lokale Spannungsverteilung für den Zeitraum Zechstein-Trias

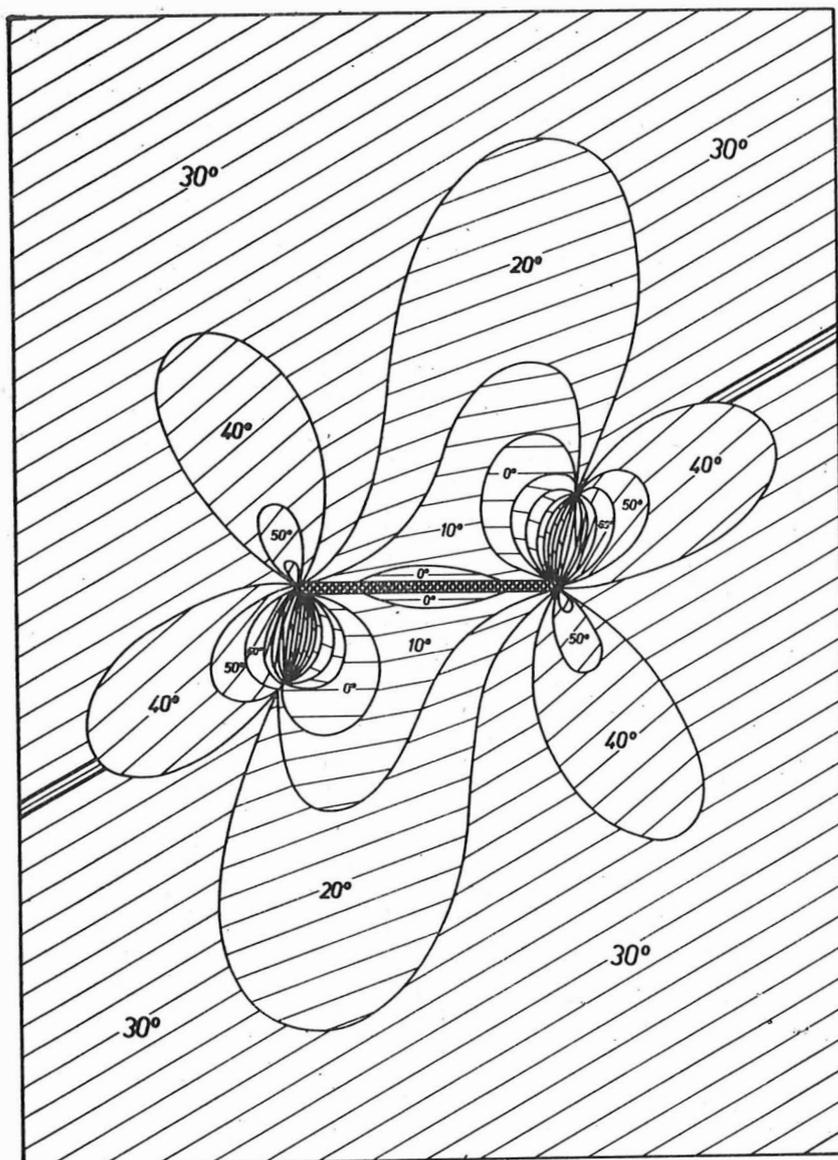


Abb. 37 Berechnete Spannungsverteilung bei einem Winkel von 30° zwischen der σ_1 -Richtung und dem Störungsverlauf

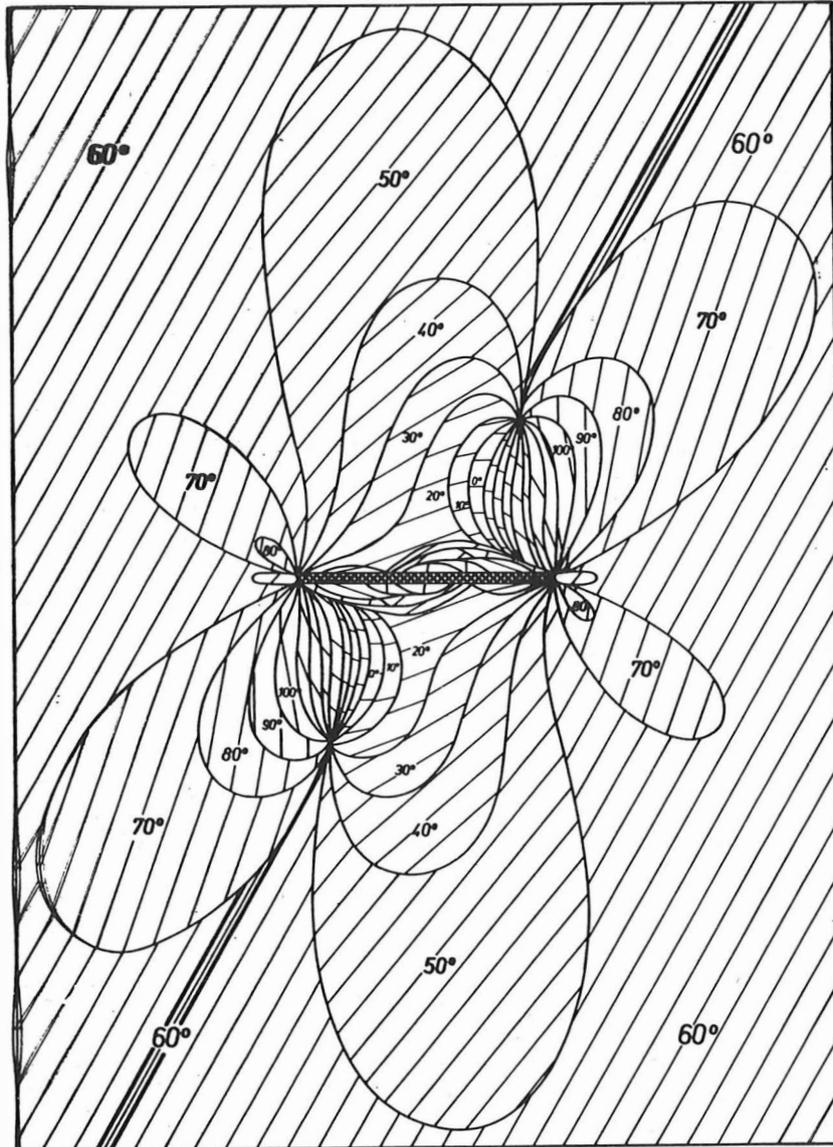


Abb. 38 Berechnete Spannungsverteilung bei einem Winkel von 60° zwischen der G_1 -Richtung und dem Störungsverlauf

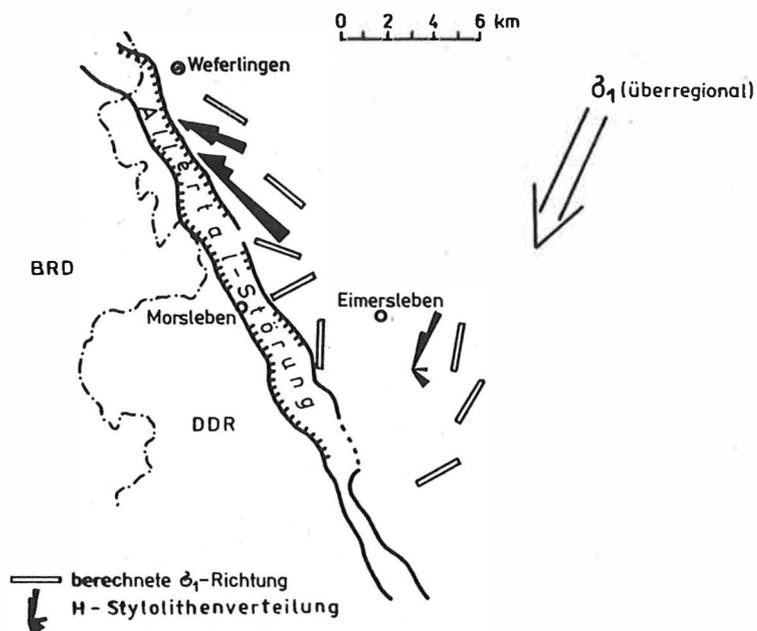


Abb. 39 Richtungen der H.-Stylolithen und berechnete σ_1 -Richtung im Bereich der Allertal-Störungszone (schematisch) (Verlauf der Störungszone nach WÄCHTER 1965)

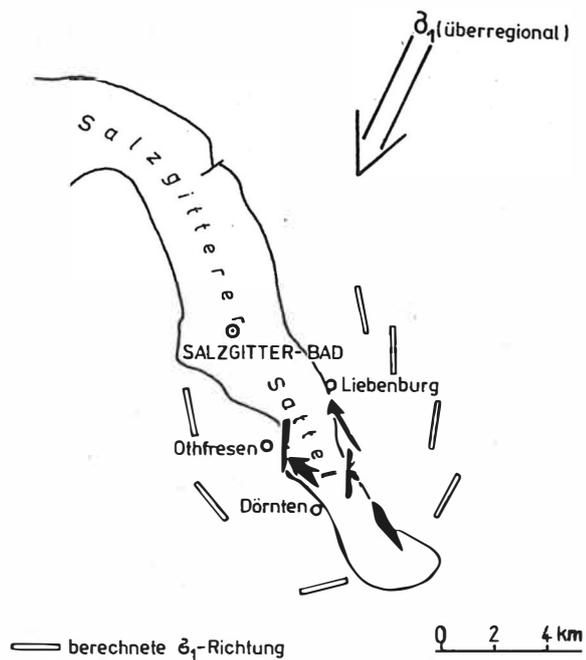


Abb. 40 Richtung der H.-Stylolithen und berechnete σ_1 -Richtung im Bereich des Salzgitterer Sattels (Grundlage: OELKE & WEIRICH 1981)

Im Anschluß an diese Feststellungen versuchen sie eine Erklärung für dieses Phänomen zu finden, ohne dabei aber zu einer befriedigenden Lösung zu kommen. Unter Voraussetzung der H.-Styrolithenbildung vor der Antiklinalentstehung ist es möglich, die H.-Styrolithenrichtungen auf das theoretische Modell der Spannungsverteilung (I) zu beziehen (Abb. 40). Es wird deutlich, daß herzynische H.-Styrolithen im Randbereich der Struktur durchaus nicht im Widerspruch zum überregionalen rheinischen Spannungsplan stehen. Selbst der Wechsel von der herzynischen in die rheinische Richtung in unmittelbar benachbarten Aufschlüssen findet durch das Modell eine Erklärung.

Neben den H.-Styrolithen spiegeln auch die NW-SE orientierten Geschwindigkeitsanisotropien in den Bereichen der Finne-Störungszone, Kreuzburg-Ilmenauer Störungszone und der Allertal-Störungszone die an Störungen gebundenen lokalen Spannungsänderungen wider.

Die Änderung der Spannungsverteilung (abgeleitet aus den H.-Styrolithenrichtungen) in Bereichen lokaler und regionaler Strukturen ist durchaus nicht einheitlich. Entscheidend ist die Ausbildung der Störungszonen (offene oder geschlossene Störung, konkreter Verlauf der Störungsränder, u.a.) zum Zeitpunkt der Styrolithengese. Ein totaler Richtungswechsel (90°) der maximalen Hauptnormalspannung ist nur bei offenen Grabenstrukturen möglich. In der Regel ist nur mit einer schwachen, auf den Grabenrand beschränkten σ_1 -Auslenkung zu rechnen. Die Folge dieser Vielzahl von geologischen Einflußfaktoren führt zu unterschiedlichen strukturbezogenen Spannungsteilungen.

5.4. Die zeitliche Entwicklung der Paläospannungsverteilung

5.4.1. Aussagen zum Bildungszeitraum der untersuchten Indikationen

Die Bildung der H.-Styrolithen erfolgt im fortgeschrittenen Stadium der Lithifikation (KURZE & NECKE 1979), aber noch vor der vollständigen Kompaktion der Sedimente und nach der Bildung der V.-Styrolithen. Die H.-Styrolithen weisen parallele Ausrichtung zu den Schichtflächen auf. Sie sind folglich noch bei horizontaler Schichtlage des Gebirges entstanden, d.h. vor der Verstellung des Schichtverbandes (FRANZKE & JANSSEN 1984). Da sämtliche beobachteten H.-Styrolithen in den Bereichen der saxoni-schen Störungszonen während des Flexur- und Abschiebungsstadiums (höherer Jura - Unterkreide nach WEBER 1975) mitverstellt wurden, ist somit eine obere Zeitmarke der H.-Styrolithenbildung gegeben. Darüber hinaus existieren folgende Hinweise, die für die ungestörten Schollenbereiche des Tafeldeckgebirges der DDR einen frühen Zeitpunkt der Styrolithengese nach der Ablagerung der Sedimente vermuten lassen:

- Die Nutzung von Mikrorissen und Mikroklüften im Gestein (als Ausgangspunkt der Styrolithenbildung), die frühdiagenetisch angelegt wurden (fundamentales Kluftsystem);
- Intraformationelle Klasten im Muschelkalk werden von Drucklösungskontakten abgegrenzt;
- Styrolithen bilden sich bereits bei sehr geringen Spannungen (20 bis 25 bar; BUCHNER 1978).

Daraus abgeleitet, wird der Zeitabschnitt zwischen Zechstein und Trias als wahrscheinlicher Bildungszeitraum für die Mehrzahl der H.-Styrolithen aus Zechstein-, Buntsandstein- und Muschelkalkkarbonaten angenommen. Dabei können in Bereichen lokaler und regionaler Störungszonen spätere Bildungen nicht ausgeschlossen werden (Zunahme der Mikrorisse ermöglicht Erhöhung der Sekundärporosität und damit erneutes Einsetzen der Drucklösungsprozesse).

Auch HOSEINIDUST (1980) beobachtete, daß die Stylolithen (V.- und H.-Stylolithen) vor der Hebung und Aufschiebung des Harzes entstanden sind. Er ordnete sie einem jung-kimmerischen Spannungsplan zu. Demgegenüber beschrieb PLESSMANN (1972) im französischen Faltenjura prä-, syn- und postkinematisch entstandene H.-Stylolithen bezogen auf die alpidische Faltungsphase. ARTHAUD & MATTAUER (1972) konnten in oberkretazisch verkarsteten Jurakalken im Languedoc Stylolithen nachweisen, die sich im Oligozän gebildet haben. Auch ILLIES (1974), HOFFERS (1974) und BUCHNER (1978) beziehen die H.-Stylolithen des Muschelkalks im Süden der BRD auf einen spätmesozoisch-alttertiären bzw. rezenten Spannungsplan.

Ein Vergleich dieser Ergebnisse mit dem in dieser Arbeit angenommenen Bildungszeitraum verdeutlicht eine zeitliche Differenz, die nach Meinung des Verfassers in den unterschiedlichen geotektonischen Positionen der Untersuchungsgebiete begründet ist. In den alpidischen Orogenbereichen und in angrenzenden Gebieten konnten sich in den Faltungsphasen erneut die physiko-chemischen Voraussetzungen zur Mobilisation der Drucklösungsprozesse einstellen, so daß hier Stylolithenbildungen auch nach Abschluß der Diagenese möglich sind. Diese Voraussetzungen existieren für die im Tafeldeckgebirge der DDR untersuchten Schollenbereiche nicht oder nur eingeschränkt (Störungszonen - siehe vorhergehende Seite). Neben der zeitlichen Fixierung des Bildungszeitraumes stellte sich die Frage nach den Altersbeziehungen der H.-Stylolithen untereinander und im Verhältnis zu weiteren kleintektonischen Deformationsstrukturen. Kennzeichnend für die in dieser Arbeit untersuchten Schollenbereiche sind alternierende Altersbeziehungen. So wurden in einigen Muschelkalkaufschlüssen rheinische H.-Stylolithen angetroffen, die deutlich jünger als herzynische Indikationen sind, während in benachbarten Aufschlüssen (in stratigraphisch gleicher Formation) umgekehrte Altersbeziehungen beobachtet wurden. Nach Beobachtungen von BUCHNER sind die NNE-SSW streichenden H.-Stylolithen im Gebiet der Süddeutschen Großscholle älter als die NW-SE streichenden. Untersuchungen in Muschelkalkaufschlüssen des Heilig-Kreuzgebirges ergaben ein älteres NE-SW H.-Stylolithenmaximum und ein jüngeres E-W streichendes (SWIDROWSKA 1980). Nach KURZE & NECKE (1979) folgt im Tafeldeckgebirge der DDR einem älteren System von NE-SW bis ENE-WSW (und wahrscheinlich auch NNW-SSE) streichenden H.-Stylolithen jüngere WNW-ESW und NNE-SSW orientierte Indikationen. Diese Aufzählung der unterschiedlichen Aussagen zur Altersstellung der H.-Stylolithen aus stratigraphisch gleichen Horizonten ließe sich noch fortsetzen.

Sehr wahrscheinlich muß man davon ausgehen, daß sowohl rheinische als auch herzynische H.-Stylolithen in etwa zeitgleich gebildet wurden. Eine Gegenüberstellung der H.-Stylolithen mit weiteren kleintektonischen Elementen auf der Grundlage von Geländebeobachtungen (vgl. Abb. 31, 33, 34, 35) und Literaturangaben (HEISSE 1966, KRUCK 1974, KURZE 1981 u.a.) ergibt folgende zeitliche Abfolge:

- a) Bildung von Wellenstreifen;
- b) Anlage eines primären Kluftsystems im Sinne von BOCK (1980); zahlreiche Mikroklüfte z.T. mineralisiert;
- c) Bildung der Sigmoidalklüfte;
- d) Bildung der H.-Stylolithen unter Nutzung des vorhandenen primären Kluftsystems;
- e) Anlage von Dehnungs- (mineralisierte Zugklüfte, Abschiebungen mit Harnischrillungen u.a.) und Einengungsformen (Auf- und Überschiebungen, Harnische, Schichtverfaltungen u.a.) in Bereichen der saxonischen Störungszonen. Syn- oder postkinematisch entstandene H.-Stylolithen bezogen auf die Auf- und Überschiebungsphase konnten nicht nachgewiesen werden.

Die Ausbildung von Anisotropien - bei den hier vorgestellten Untersuchungen handelt es sich um Elastizitätsanisotropien - erfolgt im Sediment während der Diagenese. Daraus ergibt sich die Schlußfolgerung, daß die Bildungszeit der Anisotropien in den Perm-, Trias- und Kreideproben im wesentlichen auf die jeweiligen Systeme beschränkt bleibt. Das Fehlen von Richtungsunterschieden in den Geschwindigkeitsanisotropien zwischen orientierten Proben aus benachbarten Muschelkalk- und Zechsteinaufschlüssen bestätigt die Aussagen der H.-Stylolithenverteilung (langzeitlich beständiger Spannungsplan; vgl. Abschnitt 5.4.2.).

Die Ausbildung der Anisotropie in den Plänerkalken fällt zeitlich in die Endphase der saxonischen Tektogenese (Oberkreide) und dokumentiert eine Paläospannungsverteilung, die nicht direkt im Zusammenhang mit den im Zechstein und Muschelkalk gemessenen H.-Stylolithen steht.

Für die Sigmoidalklüfte kann nach übereinstimmenden Literaturangaben (u.a. KRUCK 1974, KURZE 1981) und aufgrund der vorliegenden Beobachtungen eine frühdiagenetische Bildung als gesichert angesehen werden, d.h., der Bildungszeitraum würde den Unteren Muschelkalk umfassen.

5.4.2. Modell der Paläospannungsverteilung

Durch den postulierten Bildungszeitraum für die Mehrzahl der H.-Stylolithen und Geschwindigkeitsanisotropien sind nachfolgende Aussagen zur zeitlichen Entwicklung der Spannungsverteilung im Tafeldeckgebirge der DDR auf den Zeitraum Zechstein - Trias begrenzt.

Die im Abschnitt 5.4.1. beschriebenen alternierenden Altersbeziehungen der H.-Stylolithen aus stratigraphisch gleichen Horizonten führen unter Berücksichtigung der regionalen Untersuchungsergebnisse zu der Feststellung einer langzeitlich, homogenen Spannungsverteilung mit rheinisch orientierter maximaler Hauptnormalspannung verbunden mit lokalen, strukturgebundenen Auslenkungen.

Die Ähnlichkeit in den Verteilungsbildern der H.-Stylolithenrichtungen aus benachbarten Muschelkalk- und Zechsteinaufschlüssen bzw. Buntsandstein (Rogenstein)- und Muschelkalkaufschlüssen (Abb. 32) spricht gleichfalls für einen längerzeitlich beständigen Spannungsplan. Verallgemeinert man diese Aussagen, so kann folgendes Modell der Spannungsentwicklung für die untersuchten Schollenbereiche angenommen werden:

- Die größte horizontale Hauptnormalspannung (σ_1) ausgedrückt durch das rheinische H.-Stylolithenmaximum verläuft NNE-SSW.
- Die herzynischen H.-Stylolithen repräsentieren die NW-SE orientierte σ_2 -Richtung, wobei nur die horizontale Spannungsverteilung betrachtet wird.

H.-Stylolithenuntersuchungen aus anderen regionalen Bereichen lassen für stratigraphisch jüngere Horizonte gleichfalls eine rheinisch orientierte Hauptnormalspannungsrichtung (σ_1) vermuten. So ergaben H.-Stylolithenmessungen im Malm auf dem Gebiet der Süddeutschen Großscholle (WAGNER 1967, HOFFERS 1974) deutliche rheinische Maxima. Unter Berücksichtigung der vom Verfasser angenommenen strukturgebundenen Auslenkungen würden auch die H.-Stylolithenmessungen aus der Oberkreide in den Gebieten des westlichen Harzrandes, Lutterer Sattels (BRD; HOSSEINDUST 1980) und des Salzgitterer Sattels

(BRD; OELKE & WEIRICH 1981, vgl. Abschnitt 5.3.3.) für eine rheinische σ_1 -Richtung sprechen. Die aus den rupturellen Deformationsgefügen ermittelte Paläospannungsverteilung zeigt gleichfalls eine rheinisch orientierte maximale Hauptnormalspannung und ist an die Endphase der saxonischen Tektogenese (Oberkreide - Eozän) gebunden. Sie steht zeitlich mit den gemessenen H.-Stylolithen nicht im Zusammenhang. Die Festlegung des Eozäns als obere zeitliche Grenze der rheinischen σ_1 -Richtung beruht allein auf aus der Literatur bekannten Untersuchungsergebnissen (Süden der BRD), die davon ausgehen, daß die NNE-SSW Richtung nach einer Rotation über N-S, NNW-SSE (Oligozän/Miozän) ab Pliozän von der NW-SE Richtung abgelöst wird (WUNDERLICH 1974, ILLIES 1974). Diese Richtung ist, wie in-situ Spannungsmessungen belegen (THURM u.a. 1977, GREINER 1978), die bis heute wirksame Hauptnormalspannungsrichtung.

5.5. Ursachen der Spannungsverteilung

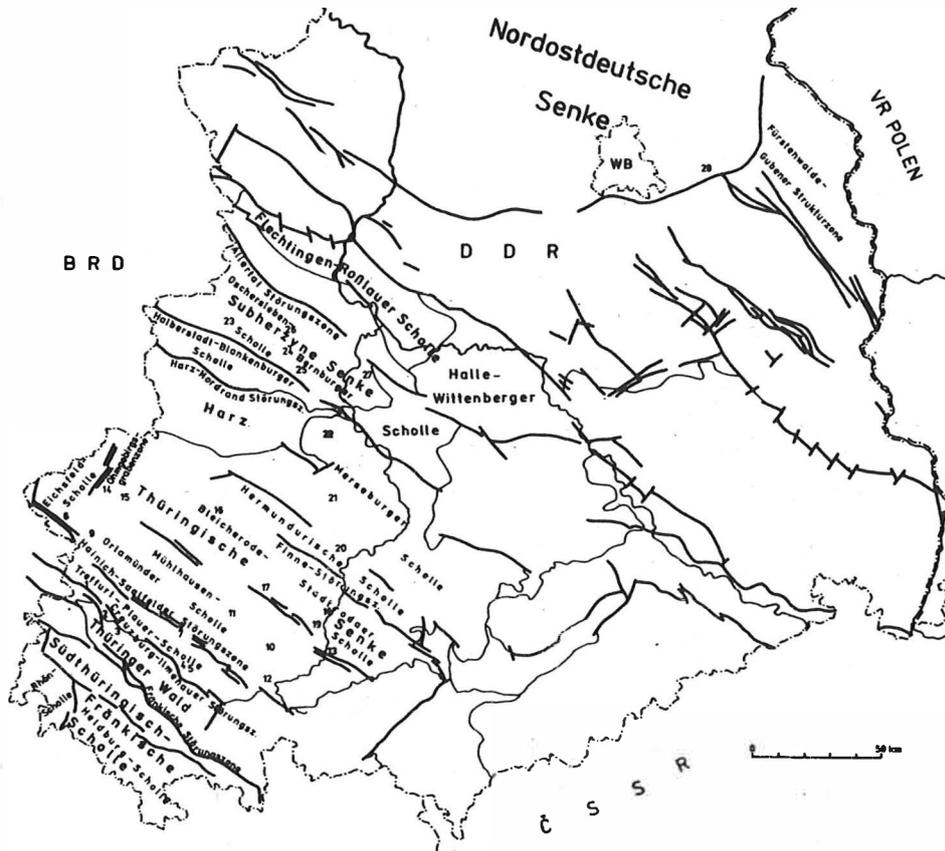
Über die Ursachen der zeitlich und regional divergierenden Paläospannungsverteilung existieren unterschiedliche Meinungen. Ein Teil der Bearbeiter (u.a. HOFFERS 1974, SWIDEROWSKA 1980) beziehen die aus der Zapfenorientierung der H.-Stylolithen (Trias, Jura) ermittelte Paläospannungsverteilung auf lokale Strukturen. PLESSMANN (1972) und WUNDERLICH (1973) leiten aus subkrustalen Strömungen ein regionales Spannungsfeld ab, das gerichtet auf das Schollenmosaik wirkt. Diese Vorstellungen wurden von KURZE & NECKE (1979) ausgebaut. In zahlreichen Arbeiten wird der Zusammenhang zwischen den Auswirkungen der Kollisionsphasen der alpidischen Mobilzone und der Spannungsverteilung beschrieben (u.a. WUNDERLICH 1973; ILLIES 1974, 1975; TOLLMANN 1978, SCHWAB u.a. 1979; SALEMEH & ZACHER 1982). So beobachteten ARTHAUD & MATTAUER (1969) H.-Stylolithen im Languedoc, die mit der "pyrenäischen" N-S Kompressionsphase im Oberen Eozän in Verbindung stehen. ILLIES (1974) sieht in der Kollision der afrikanischen mit der eurasischen Platte die Ursache für die Dominanz der rheinischen Richtung über einen größeren meso- bis känozoischen Zeitraum. Mit Abschwächung der nordgerichteten Hauptkompressionsphase im höheren Alttertiär setzte im Oberen Pliozän eine sinistrale Rotation der σ_1 -Richtung um 60° ein, die durch das zeitlich verzögerte Vorrücken des Alpen-Westkarpatisensystems verursacht wird (ILLIES 1974) und nach ILLIES und BUCHNER (1978) die Bildung der herzynischen H.-Stylolithen zur Folge hatte. Unschärfer und vielschichtiger werden die Zusammenhänge zwischen Spannungsverteilung und Plattentektonik in den außer-alpidischen, saxonisch (germanotyp) deformierten Schollenbereichen Mitteleuropas. Zwar wurde auch hier die Möglichkeit der Übertragung der Kollisionswirkungen aus den alpidischen Orogengebieten in die Bereiche der herzynischen und rheinischen Schollengrenzen im Tafeldeckgebirge der DDR diskutiert (SCHWAB 1981, STACKEBRANDT 1983), doch Zeitverschiebungen zwischen den Kompressionsphasen im Alpenorogen und den Auswirkungen an den saxonischen Schollenrändern sowie Modifizierungen durch präexistente Bruchmuster komplizieren die Beziehungen zwischen plattentektonischen Aktivitäten und der Spannungsverteilung.

Berücksichtigt man jetzt noch die in den Untersuchungen erfolgte zeitliche Fixierung der Mehrzahl der gemessenen H.-Stylolithen auf den Zeitabschnitt Zechstein - Trias, so wird deutlich, daß die Auswirkungen der Kollisionsphasen des neoeuropäischen Orogengürtels allein nicht ausreichen, das komplizierte Bild der rekonstruierten Paläospannungsverteilung, wie es bei der regionalen Auswertung beschrieben wurde (Abschnitt 5.3.2.

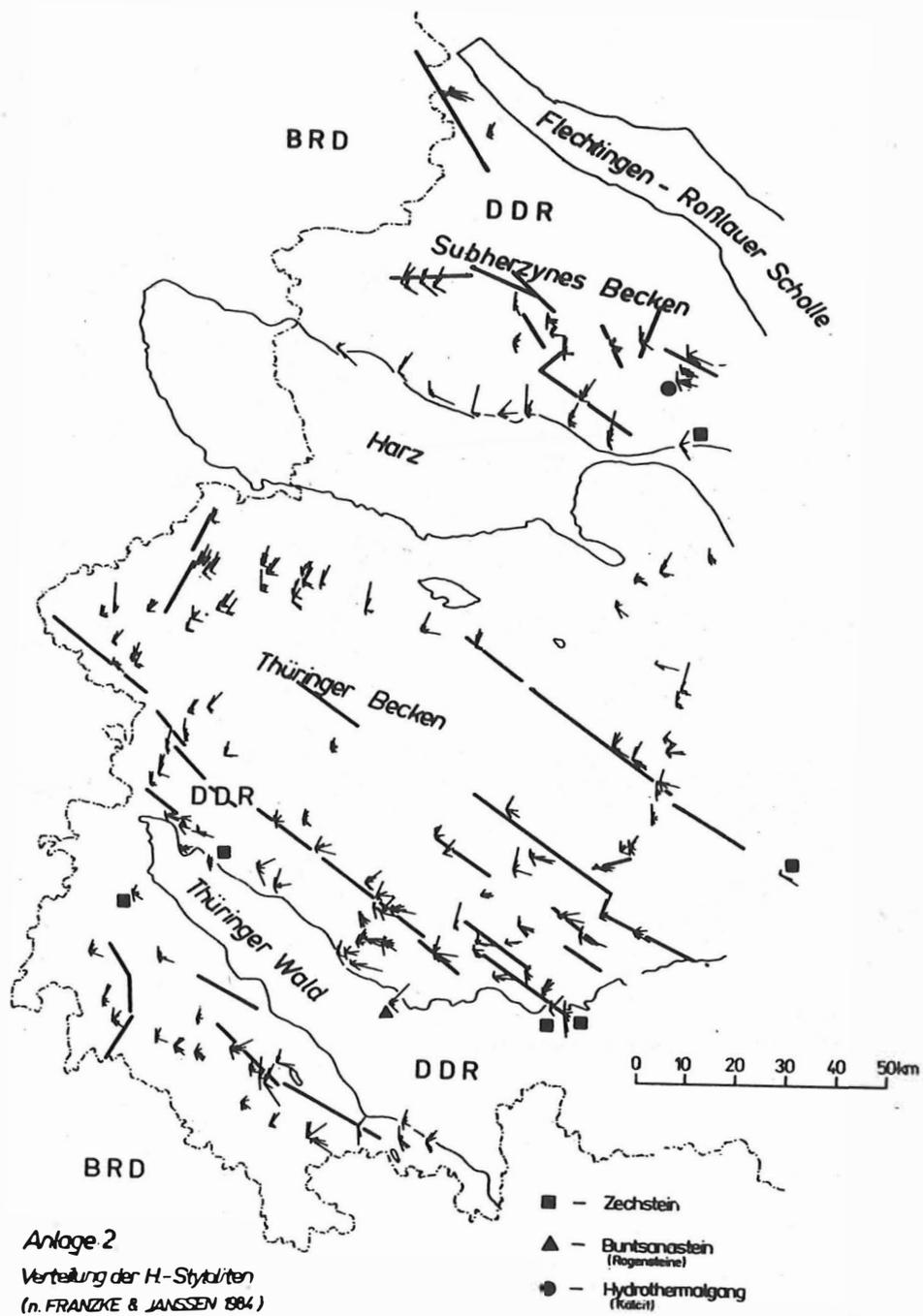
und 5.3.3.), zu erklären. Vielmehr muß man für den angenommenen Zeitraum nach der Auffassung verschiedener Autoren (u.a. ZIEGLER 1978, SCHWAB 1981, STACKEBRANDT 1983) in den untersuchten Schollenbereichen von der Überlagerung unterschiedlicher geotektonischer Prozesse ausgehen, die zwar kausal im Zusammenhang stehen, aber differenziert auf die Paläospannungsverteilung einwirken. So wird die überregionale Dominanz der rheinischen Richtung und ihre Bindung an den großregionalen Strukturbau im Zusammenhang mit den von SCHWAB (1981) beschriebenen weitspannigen, epirogenen Bewegungen des Hauptabsenkungsstadiums gesehen. Paläotektonische Aktivitäten der deformierten Krustenstrukturen (Senkungs- und Hebungsgebiete, tektonische Bruchzonen) bedingen eine Anpassung der regionalen Spannungsfelder (SCHWAB u.a. 1979). Die Hauptabsenkung ist dem Konsolidierungsprozeß in der variszischen Mobilzone entgegengesetzt und damit Teil des Riftungsprozesses im Anschluß an die variszische Tektogenese (ZIEGLER 1978).

Neben dem beschriebenen Zusammenhang von Spannungsverteilung und übergeordneter Paläomobilität (im Sinne von SCHWAB u.a. 1979) muß mit einer frühzeitigen internen Dynamik der Schollen (SCHRETZENMAYR 1981) und damit mit einer zusätzlichen Beeinflussung der lokalen Spannungsverteilung gerechnet werden. SCHRETZENMAYR spricht von einer seit der Formierung des Schollenbaus aktiven Mobilität, die er als "remanente Mobilität" bezeichnet.

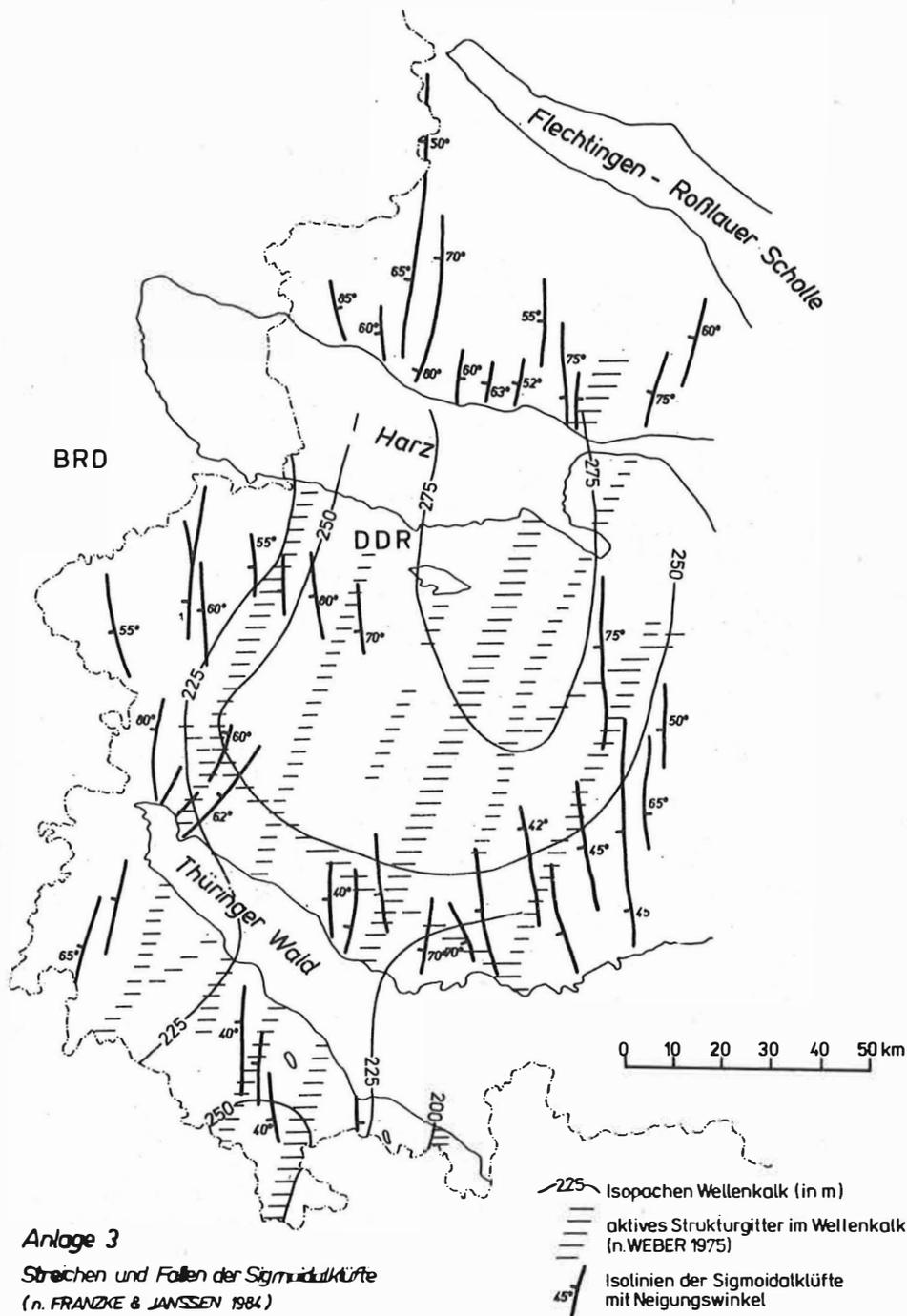
Insgesamt wird deutlich, daß die Paläospannungsverteilung im Tafeldeckgebirge der DDR durch ursächlich im Zusammenhang stehende tektonische Prozeßabläufe gesteuert wird, die sich lediglich in der Dimension ihrer Wirkung unterscheiden (globale Bewegungsvorgänge, weitspannige epirogene Bewegungen, mittelspannige diagonale Scherbewegungen, interne Schollendynamik).

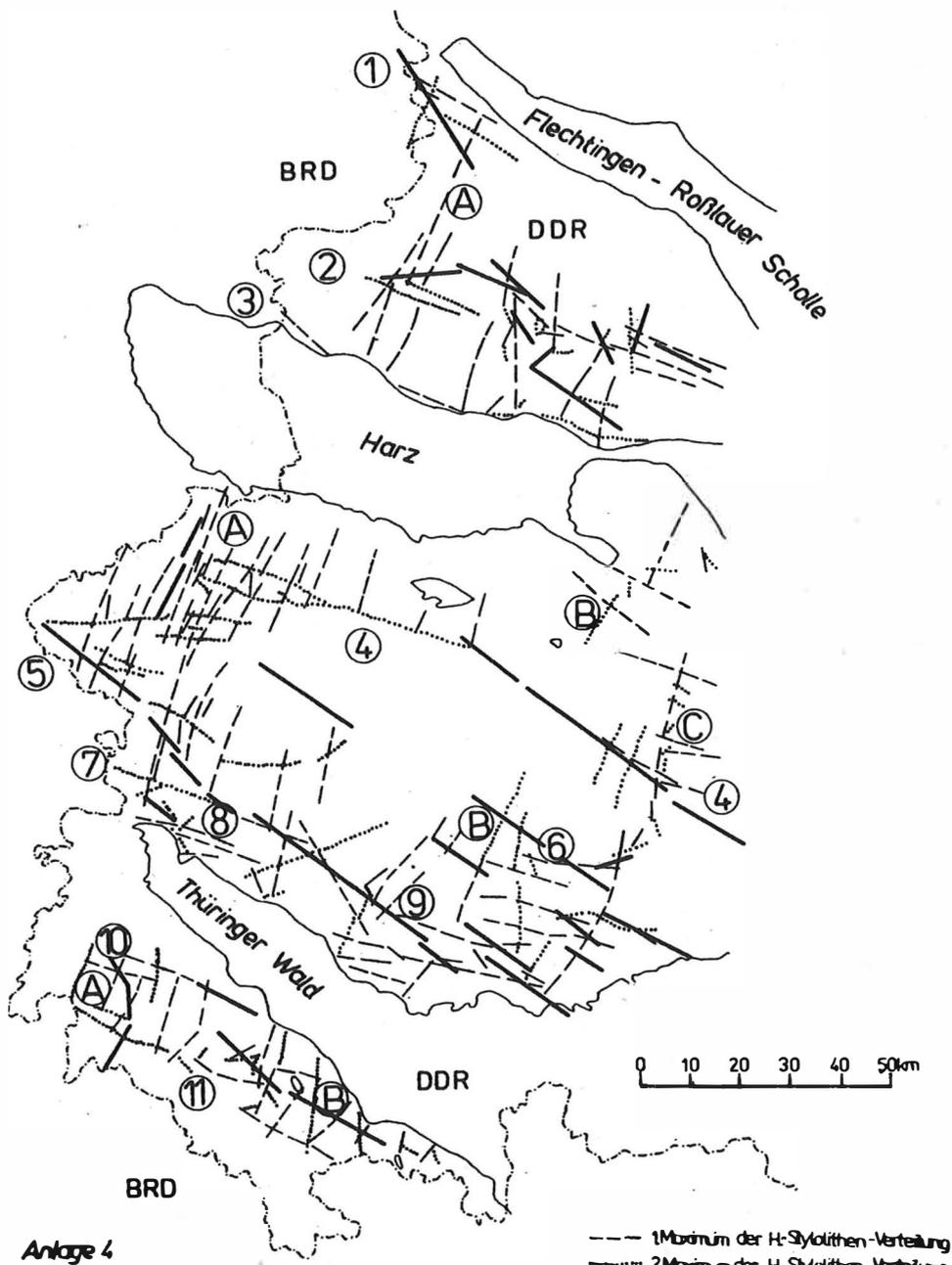


Anlage 1
Lage der bearbeiteten Schollen und Strukturbereiche



Anlage 2
 Verteilung der H-Styloliten
 (n. FRANZKE & JANSSEN 1984)

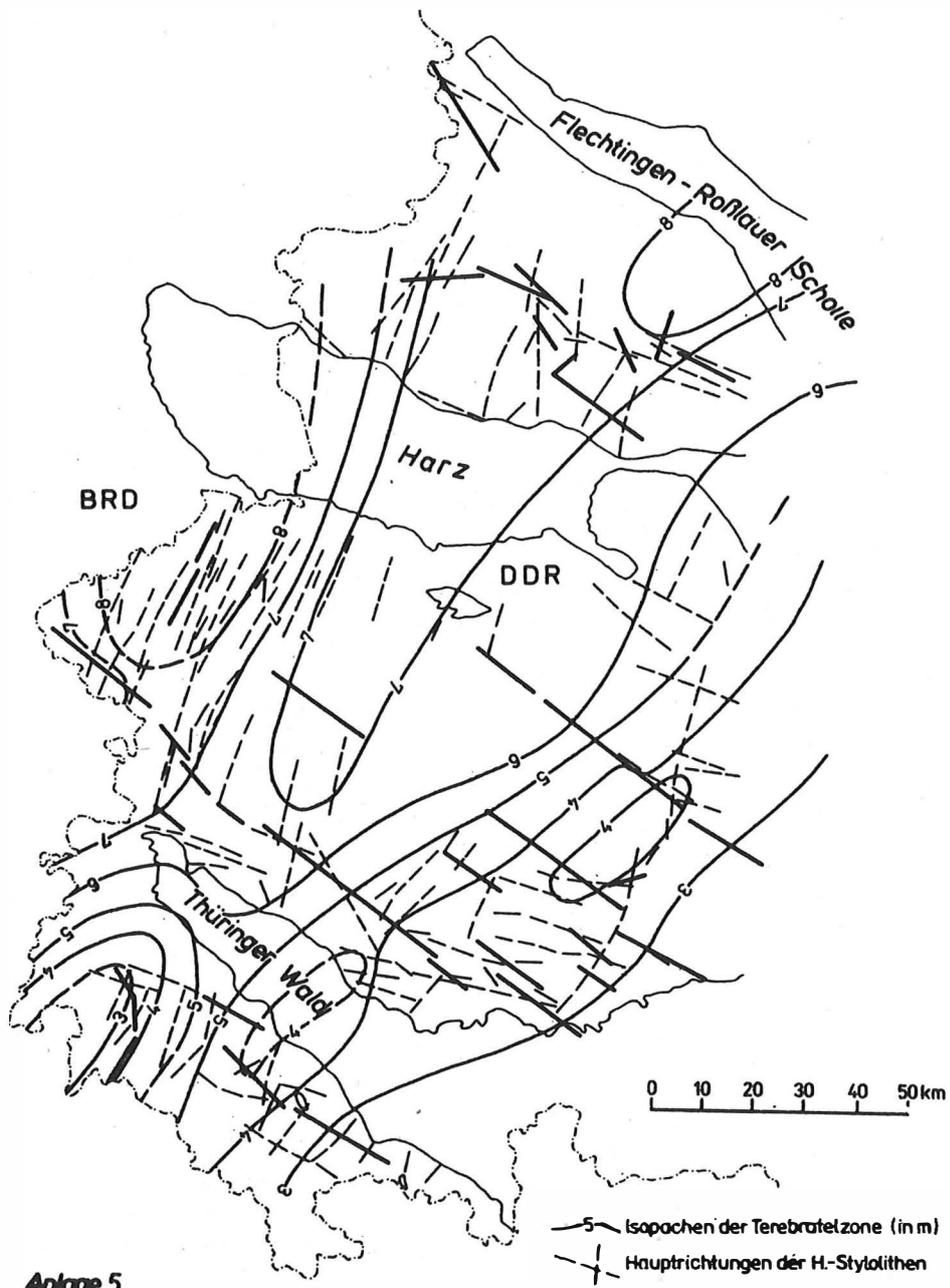




Anlage 4

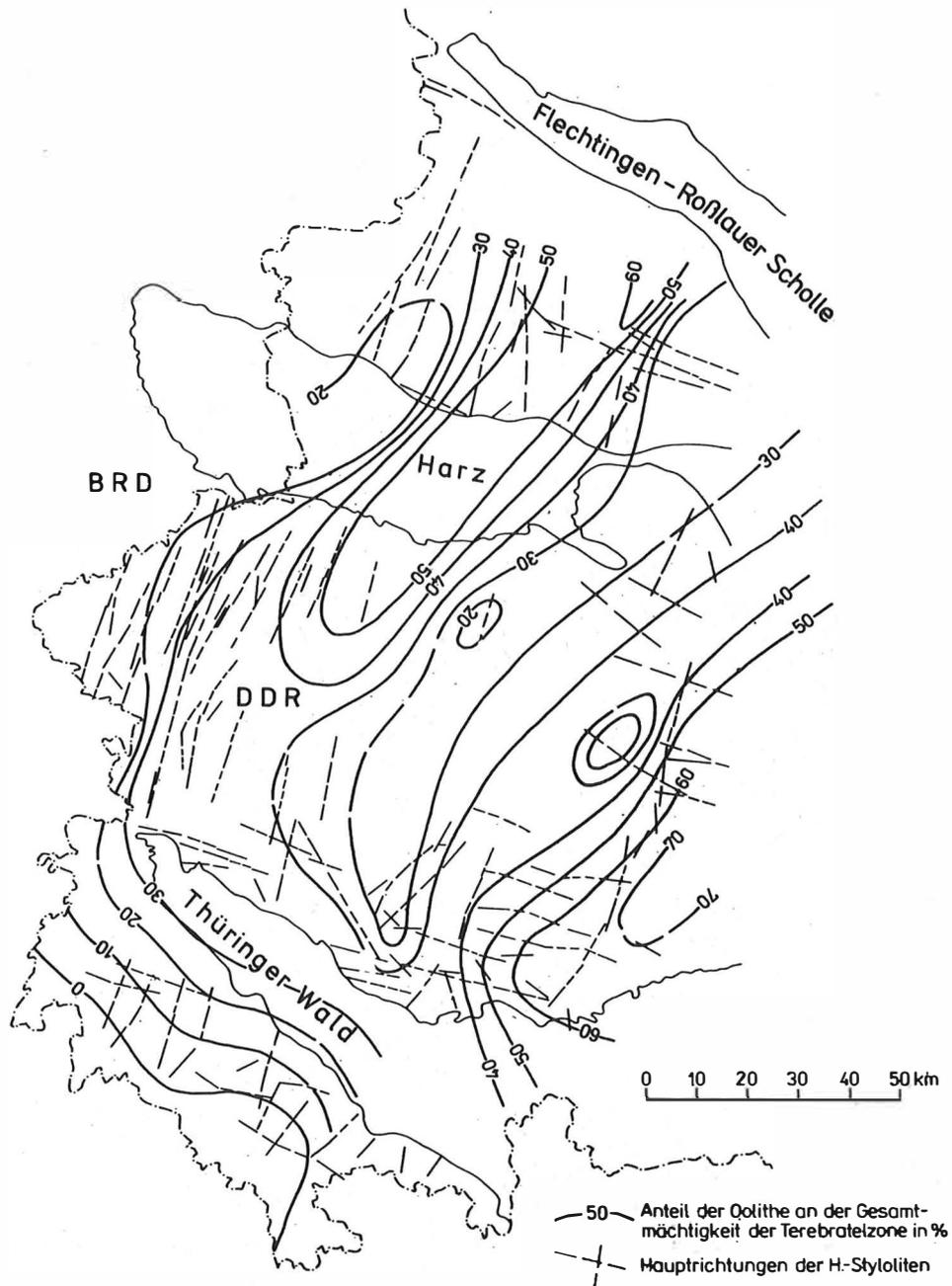
Abhängigkeit der Richtungsmaxima vom
 lokalen und regionalen Strukturbau
 (n. FRANZKE & JANSSEN 1984)

- 1 Maximum der H-Stylolithen-Verteilung
- - - 2 Maximum der H-Stylolithen-Verteilung
- lokale u. regionale Störungen



Anlage 5

Hauptrichtungen der H-Stylolithen bezogen auf die Mächtigkeiten der Terebratellazone
 (Mächtigkeiten der Terebratellazone n. WENGLAND 1985)



Anlage 6

Hauptrichtungen der H-Stylolithen bezogen auf die lithologische Zonierung der Terebratellzone
 (Lithologische Zonierung n. WENGLAND 1985)

Anlage 7 Legende der tektonischen Gefügediagramme

	H.-Stylolithen
	Sigmoidalklüfte
	Geschwindigkeitsanisotropie
	Rillung auf ss-Fläche
	Fiederkluft, Fiedergang
	Kluff
	Kluff, mineralisiert
	Störung
	Schichtfläche
	B-Achse
	Scherfläche, allgem.
	Scherfläche
	Abschiebung

Legende zu den Strukturbereichen

I	Allertal-Störungszone (innen)
II	Allertal-Störungszone (außen)
III	Huy
IV	Hakel
V	Ascherslebener Sattel
VI	Steißfurter Sattel
VII	Bernburger Sattel
VIII	Harz-Nordrandstörung
IX	Eichsfeld-Scholle
X	Ohmgebirgsgrabenzone (innen)
XI	Ohmgebirgsgrabenzone (außen)
XII	Dün
XIII	Hainleite
XIV	Hainich-Saalfelder Störungszone (NW-Abschnitt)
XV	Hainich-Saalfelder Störungszone (Mittelabschnitt)
XVI	Hainich-Saalfelder Störungszone (Mittelabschnitt)
XVII	Hainich-Saalfelder Störungszone (SE-Abschnitt)

7. Literaturverzeichnis

- ARTHAUD, F.: Methode de determination graphique des directions de raccourcissement d'allongement et intermediaire d'une population de feuilles. - Bull. Soc. geol. France, Paris 11 (1969) 5, S. 729-737
- ARTHAUD, F.; MATTAUER, M.: Exemples de stylolites d'origine tectonique dans le Languedoc, leur relation avec la tectonique cassante. - Bull. Soc. geol. France, Paris 11 (1969) 7, S. 738-744
- ARTHAUD, F.; MATTAUER, M.: Sur l'origine tectonique de certains joints stylolitiques paralleles a la stratification; leur relation avec une phase de distension (exemple du Languedoc). - Bull. Soc. geol. France, Paris 14 (1972) 7, S. 12-17
- ARTHAUD, F.; CHOUKROUNE, P.: Methodes d'analyse de la tectonique cassante a l'aide des microstructures dans les zones peu deformeées; Exemple de la plateforme nord-aquitaine. - Rev. Inst. franz. Petrol., Paris 17 (1972) 5, S. 715-732
- BANKWITZ, P.: Über Klüfte I. Beobachtungen im Thüringer Schiefergebirge. - Geologie, Berlin 14 (1965) 3, S. 241-253
- BANKWITZ, P.: Über Klüfte II. Entstehung von Klüftflächen und eine Systematik ihrer Strukturen. - Geologie, Berlin 15 (1966) 8, S. 896-941
- BANKWITZ, P.: Über Klüfte III. Die Entstehung von Säulenklüften. - Z. geol. Wiss., Berlin 6 (1978) 3, S. 285-298
- BANKWITZ, P.: Über Klüfte IV. Aspekte einer bruchphysikalischen Interpretation geologischer Rupturen. - Z. geol. Wiss., Berlin 6 (1978) 3, S. 301-311
- BANKWITZ, P.: Zum Bewegungsablauf an Bruchstörungen mit seismotektonischer Aktivität. - Z. geol. Wiss., Berlin 8 (1980) 3, S. 353-362
- BANKWITZ, P.: Exkursionsführer Rupturen IV. Praktische Anwendung der Bruchanalyse. Vortrags- und Exkursionstagung der Ges. Geol. Wiss. DDR vom 20. bis 22. April 1982 in Gehren. - Berlin: Ges. Geol. Wiss. DDR, 1982, 32 S.
- BANKWITZ, P., BANKWITZ, E.: Die Symmetrie der Klüftoberflächen und ihre Nutzung für eine Paläospannungsanalyse. - Z. geol. Wiss., Berlin 12 (1984) 3, S. 305-334
- BATHURST, R.G.C. (1958): Digenetic fabrics in some British Dinantian limestones. - Geol. J., Liverpool; Manchester 2 (1958) 1, S. 11-36
- BAUMBACH, M.; JANSSEN, C.: Berechnung der Spannungsverteilung an Störungen. - 1982.- Potsdam, Zentralinst. Physik Erde, 14. Wiss. Jahrestagung, Vortrag
- BEIERSDORF, H.: Druckspannungsindizien in Karbonatgesteinen Süd-Niedersachsens, Ost-Westfalens und Nord-Hessens. - Geol. Mitt., Aachen 8 (1969), S. 217-262
- BEUTLER, G.: Verbreitung und Charakter der altkimmerischen Hauptdiskordanz in Mitteleuropa. - Z. geol. Wiss., Berlin 7 (1979) 5, S. 617-632
- BOCK, H.: Zur Mechanik der Klüftentstehung in Sedimentgesteinen. - Veröff. Inst. Bodenmech. - Felsmech. Univ. Karlsruhe, Karlsruhe (1972) 53, S. 1-16
- BOCK, H.: Simulation tektonischer Restspannungen in einer Finite-Element-Berechnung. - Z. dt. geol. Ges., Hannover 126 (1975) 1, S. 101-109
- BOCK, H.: Einige Beobachtungen und Überlegungen zur Klüftentstehung in Sedimentgesteinen. - Geol. Rdsch., Stuttgart 65 (1976) 1, S. 83-101

- BOCK, H.: Das fundamentale Kluftsystem. -
Z. dt. geol. Ges., Hannover 131 (1980) 3, S. 627-650
- BOER, R.B. de: Pressure solution - theory and experiments. -
Tectonophysics, Amsterdam 54 (1977), S. 287-301
- BREDDIN, H.: Die tektonische Deformation der Fossilien und Gesteine in der Molasse von St. Gallen (Schweiz). -
Geol. Mitt., Aachen 4 (1964), S. 1-68
- BRINKMANN, R.; GIESEI, W. & HOEPPNER, R.: Über Versuche zur Bestimmung der Gesteinsanisotropie. -
N. Jb. Geol. Paläont. Mh., Stuttgart (1961) 1, S. 22-23
- BUBNOFF, S. v.: Grundprobleme der Geologie. -
Berlin: Akademie-Verlag, 1954. - 3. Auflage
- BUBNOFF, S. v.: Der geotektonische Charakter Thüringens. In: Beiträge zur Tektonik des Thüringer Beckens I. -
Abh. dt. Akad. Wiss. Berlin, Kl. Math. u. allg. Naturwiss., Berlin 1953 (1955) 3, S. 5-17 (Abh. z. Geotektonik; Nr. 5)
- BUBNOFF, S. v.; JUBITZ, K.-B.; SCHWAN, W.: Exkursionsführer für die Exkursionen I, A und B im Rahmen der Jahrestagung der Geologischen Gesellschaft in der Deutschen Demokratischen Republik vom 26. April bis 29. April 1957 in Wernigerode/Harz. -
Berlin: Akademie-Verlag, 1957. - 73 S.
- BUCHNER, F.: Über Horizontalstylolithen im Muschelkalk des Kraichgau (SW-Deutschland) und ihr tektonischer Rahmen. -
Oberrh. geol. Abh., Karlsruhe 27 (1978) 1/2, S. 1-9
- BUCHNER, F.: Rhingraben: horizontal stylolites indicating stress regimes if earther stages of rifting. -
Tectonophysics, Amsterdam 73 (1981) 1-3, S. 113-118
- CLOOS, H.: Einführung in die Geologie. -
Berlin: Gebr. Bornträger, 1936. - Nachdruck 1963
- CORRENS, C.W.: Einführung in die Mineralogie. -
Berlin: Springer-Verlag, 1949. - 414 S.
- DEELMAN, J.C.: "Pressure Solution" re-examinaded. -
N. Jb. Geol. Paläont. Mh., Stuttgart (1975) 3, S. 384-397
- DELAIR, J.; LEROUX, U.: Methodes de quantification de la disparition de matiec an niveande stylolites tectoniques et mecanismes de la deformation cassante des calcaires. -
Bull. Soc. geol. France, Paris 20 (1978), S. 137-144
- DIETZ, C.: Tektonik und Salz des unteren Eichfeldes. -
Abh. d. Preuß. Geol. Landesanst., N.F., Berlin 95 (1923-25)
- DUCKSTEIN, K.: Die erdgeschichtliche Bedeutung und zeitliche Festlegung der Kluftgitter im Muschelkalk des nördlichen Harzvorlandes u. Nordthüringens. -
Beiträge Geol. Thüringens, Jena 3 (1944) 3, S. 54-139
- ENGELS, B.: Zur Deutung der Querplattung (Sigmoidalklüftung). -
Mitt. Geol. Staatsinst. Hamburg, Hamburg 25 (1956), S. 5-25
- ERBEN, H.K.: Die Biomineralisation: Ein Grenzflächenprozeß zweier Systeme. -
Nova Acta Leopold. N. F., Halle (Saale) 47 (1975) 226, S. 83-90
- FIEDLER, K.: Strukturgeologische Untersuchungen zur Querplattung (Sigmoidalklüftung) in den Oberkreide-Kalken des Osnings. -
Mitt. Geol. Staatsinst. Hamburg, Hamburg 34 (1963), S. 5-125
- FIEDLER, K.: Linsige Zerscherungen in Kalken. -
Mitt. Geol.-Paläont. Inst. Univ. Hamburg, Hamburg 43 (1974), S. 173-194

- FRANZKE, J.; JANSSEN, C.: Geologische Interpretation von Druckspannungsmessungen im Tafeldeckgebirge der DDR.-
Z. geol. Wiss., Berlin 12 (1984) 2, S. 235-254
- FREUND, D.: Zur quantitativen Erfassung von Cracks in Gesteinen.-
1981. - Potsdam, Zentralinst. Physik Erde, 13. Wiss. Jahrestagung, Vortrag
- FRIEDEL, C.-H.: Zur kleintektonischen Analyse, Bewertung und Interpretation tektonischer Drucklösungserscheinungen.-
Veröff., Zentralinst. Physik Erde, Potsdam (1985), S. 81-116
- GEBHARDT, D.: Beiträge zur Untersuchung der Beziehungen zwischen Paläospannungsverteilung und Anisotropien im Karbonatgestein der Struktur Rüdersdorf.-
1981. - Potsdam, Zentralinst. Physik Erde, 13. Wiss. Jahrestagung, Vortrag
- GEHLEN, K. v.; VOLL, R.: Röntgenographische Gefügeanalyse mit dem Texturgoniometer am Beispiel von Quarziten aus kaledonischen Überschiebungszonen. -
Geol. Rdsch., Stuttgart 51 (1961) 3, S. 440-450
- GIESEL, W.: Elastische Anisotropie in tektonisch verformten Sedimentgesteinen. -
1962. - Bonn, Univ. Diss. (unveröff.)
- GREINER, G.: Spannungen in der Erdkruste. - Bestimmung und Interpretation am Beispiel von insitu-Messungen im süddeutschen Raum. -
1978. - Karlsruhe, Univ., Diss. - 192 S.
- GRUMBT, E.: Der Nordostrand des Thüringer Waldes zwischen Ruhlaer Kristallin und Schwarzburger Sattel. -
Abh. dt. Akad. Wiss. Berlin, Kl. Chemie, Geol. u. Biol., Berlin 1959 (1968) 3, 76 S.
- GRUMBT, E.: Bruchtektonik und Hydrothermalmineralisation im Thüringer Wald. Rupturen IV. Praktische Anwendung der Bruchanalyse. -
1982. - Gehren, Ges. Geol. Wiss. DDR, Vortrags- und Exkursionstagung, Vortrag
- GUZZETTA, G.: Kinematics of stylolite formation and physics of the pressure-solution process. -
Tectonophysics, Amsterdam 101 (1984), S. 383-394
- HANCOCK, P.; ATIYA, M.S.: Tectonic significance of mesofracture systems associated with the Lebanese segment of the bead sea transform fault. -
Struct. Geol. Oxford 1 (1979) 2, S. 143-153
- HESSELMANN, W.; SCHWANDT, A.: Zur Bruchtektonik im Salinar und Deckgebirge. -
Z. geol. Wiss., Berlin 9 (1981) 3, S. 283-292
- HINZ, K.: Geologie des Hakels (Subherzynes Becken) unter besonderer Berücksichtigung der Feinstratigraphie des Unteren Muschelkalks. -
1957. - Berlin, Univ., Dipl.-Arbeit (unveröff.)
- HOFFERS, B.: Horizontalstylolithen, Abschiebungen, Klüfte und Harnische im Gebiet des Hohenzollerngrabens und ihre Altersverhältnisse. -
Oberrhein. geol. Abh., Karlsruhe 23 (1974) 1/2, S. 65-73
- HORTENBACH, R.: Drucklösungserscheinungen in Karbonaten und ihre Bedeutung. -
Z. geol. Wiss., Berlin 5 (1977) 5, S. 617-621
- HOSSEINIDUST, S.D.: Klüfte und Stylolithen am Nordwestlichen Harzrand und im Lutterer Sattel in ihrer Bedeutung für die tektonische Auflösung dieses Gebietes. -
Clausthaler Geol. Abh., Clausthal-Zellerfeld 36 (1980), 61 S.
- HURTIG, E.: Zum Problem der Anisotropie petrophysikalischer Parameter in geologischen Körpern. -
Geophys. u. Geol., Leipzig 12 (1968), S. 3-36

- ILLIES, H.: Intraplattentektonik in Mitteleuropa und der Rheingraben. -
Oberrhein. geol. Abh., Karlsruhe 23 (1974) 1/2, S. 1-24
- ILLIES, H.: Plattentektonikhypothese: Testfall Europa. -
Nova Acta Leopold. N. F., Halle 47 (1975) 226, S. 71-82
- JANSSEN, C.; MÜLLER, H.J.: Analyse paläotektonischer Spannungen auf der Grundlage
von Ultraschallmessungen an H.-Stylolithen. -
Z. angew. Geologie, Berlin 27 (1981) 12, S. 607-610
- JANSSEN, C.; CREUTZ, U.: Über Analogien zwischen Druck- und Schädelstüren. -
Gegenbauers morph. Jahrb., Leipzig 127 (1981) 4, S. 552-562
- JUBITZ, K.-B.; HEIMLICH, K.; KUPKE, H.: Geologie der Struktur Rüdersdorf. - In:
KAUTZSCH, E.; JUBITZ, K.-B. (Hrsg.): Exkursionsführer Brandenburg, 7. Jahres-
tagung der Geol. Ges. DDR, Berlin. -
Berlin: Akademie-Verlag, 1960. - S. 57-86
- KERN, H.: Gefügeregelung und elastische Anisotropie eines Marmors. -
Contr. Mineral. and Petrol., Berlin, Heidelberg, New York, 43 (1974) 1, S. 47-54
- KLOCKMANN, H.: Lehrbuch der Mineralogie. - In: RAMDOHR, P.; STRUNZ, H. (Hrsg.). -
Stuttgart: F. Enke, 1978. - 876 S.
- KNAPPE, H.: Zur Tektonik der Ohmgebirgsgrabenzone im Bereich des "Thomas-Müntzer-
Schachtes" bei Holungen. -
Abh. dt. Akad. Wiss., Berlin, Kl. Chemie, Geol. u. Biol., Berlin 1955 (1957) 10,
S. 50-83
- KOLB, U.: Lithofazielle und geologische Untersuchungen der Wellenkalkfolgen des
Subherzynen Beckens. -
Freiberger Forsch.-H., Leipzig (1976) C 316, S. 41-69
- KRUCK, W.: Querplattung im Muschelkalk Nordwestdeutschlands. -
Mitt. Geol.-Paläont. Inst. Univ. Hamburg, Hamburg 43 (1974), S. 127-172
- KURZE, M.: Zum Problem der Entstehung von Wellenstreifen und Querplattung im Muschel-
kalk. -
Z. geol. Wiss., Berlin 2 (1981) 5, S. 489-498
- KURZE, M.; NECKE, G.: Horizontalstylolithen als regional-geologische Druckspannungs-
indizien. -
Z. geol. Wiss., Berlin 7 (1979) 5, S. 633-639
- LOTZE, F.: Zur Erklärung der Querplattung (Sigmoidalklüftung) im Wellenkalk. -
Centralbl. Min. etc. B, Stuttgart (1932), S. 300-307
- LÜTZNER, H.: Regionalgeologische Gliederung und Stellung. In: Geologie von Thüringen. -
Gotha; Leipzig: Hermann Haack, 1974. - 1000 S.
- LÜTZNER, H.; ELLENBERG, J.; FALK, F.; GRUMBT, E.; STACKEBRANDT, W.; STOLL, A.; WEND-
LAND, F.: Herzynische und rheinische Tektonik in Südwestthüringen. -
Z. geol. Wiss. Berlin 2 (1981) 12, S. 1487-1489
- MEINECKE, W.; HURDIG, E.; WEINER, J.: Temperaturverteilung, Wärmeleitfähigkeit und
Wärmefluß im Thüringer Becken. -
Geophys. u. Geol., Leipzig 11 (1966), S. 40-71
- MEINHOLD, R.: Neue Erkenntnisse über Diagenese disperser organischer Substanzen. -
Z. angew. Geol., Berlin 23 (1977) 1, S. 16-21

- MILITZER, H.; SCHÖN, J.; STÖTZNER, U. u. STOLL, R.: Angewandte Geophysik im Ingenieur- und Bergbau. - Leipzig: Dt. Verl. Grundstoffindustrie, 1978. - 318 S.
- NÖLDEKE, W.; SCHWAB, G.: Geologische Untersuchungen im Tafeldeckgebirge der DDR. - Z. angew. Geol., Berlin 21 (1975) 9
- OEIKE, W.; WEIRICH, H.-J.: Horizontalstylolithen im Südtteil des Salzgitterer Sattels. - Clausthaler Geol. Abh., Clausthal-Zellerfeld 41 (1981), S. 129-133
- PETERSEN, H.: Handbuch der mikroskopischen Anatomie des Menschen. - Berlin: Gebr. Bornträger, 1930
- PLESSMANN, W.: Horizontalstylolithen im französisch-schweizerischen Tafel- und Faltenjura und ihre Einpassung in den regionalen Rahmen. - Geol. Rdsch., Stuttgart 61 (1972), S. 332-347
- PLESSMANN, W.; SPAETH, G.: Beziehung zwischen Gesteinsdeformation und Schallgeschwindigkeit. - Geol. Rdsch., Stuttgart 61 (1972), S. 1010-1019
- PLIENINGER, T.: Über Stylolithen, Fährten und Rutschflächen und deren Bildung. - Jh. Ver. Vaterl. Naturkd. Württ., Stuttgart (1852) 1, S. 78-117
- RAST, H.: Zur Frage rheinisch gerichteter Strukturen im Thüringer Becken. - Geophys. u. Geol. Leipzig 9 (1966), S. 33-43
- REIS, O.M.: Über Stylolithen, Dutenmergel und Landschaftskalk. - Geom. Jh., München 15 (1902), S. 157-279
- RICHTER-BERNBURG, G.: The Oberrhein Graben in its European and global setting. In: ILLIES, J.H.; FUCHS, K.: Approaches to Taphrogenesis. Inter-Union on Geodynamics Scientific Report No. 8. - Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1974. - S. 13-43
- SALAMEH, E.; ZACHER, W.: Horizontalstylolithes and palaeostress in Jordanien. - N. Jb. Geol. Paläont. Mh. Stuttgart (1982) 8, S. 509-512
- SCHMITT, P.H.: Zur Petrogenese des Fränkischen Wellenkalkes. - Chemie der Erde, Jena 9 (1935), S. 321-364
- SCHRETZENMAYR, St.: Remanente Mobilität des Schollenbaus junger Tafelgebiete am Beispiel der Norddeutsch-Polnischen Senke. - Z. geol. Wiss., Berlin 9 (1981) 12, S. 1361-1377
- SCHUBERT, A.; FRANZKE, H.J.: Zur Tektonik der Erfurter Störungszone 1982. - Erfurt, 2. Triaskolloquium der Ges. Geol. Wiss. DDR, Paläogeographie der Trias, Vortrag
- SCHWAB, G.: Paläotektonische, neotektonische und rezente Krustenbewegungen im Gebiet der DDR. - Z. geol. Wiss., Berlin 9 (1981) 11, S. 1223-1236
- SCHWAB, G.; TESCHKE, H.-J.; JUBITZ, K.-B.: Zur Raum-Zeit-Beziehung zwischen rezenten Krustenbewegungen und Paläotektonik im Bereich der Norddeutsch-Polnischen Senke. - Z. angew. Geol., Berlin 19 (1973), S. 579-586
- SCHWAB, G.; JUBITZ, K.-B.; MEIER, R.: Zu einigen Aspekten der stofflichen und strukturellen Entwicklung im Tafeldeckgebirge des nördlichen Mitteleuropas, speziell zu Fragen der Postumität. - Veröff., Zentralinst. Physik Erde, Potsdam 14 (1975), S. 85-111
- SCHWAB, G.; NÖLDEKE, W.; TESCHKE, H.-J. u.a.: Zur Paläomobilität junger Tafeln, dargestellt am Beispiel der Norddeutsch-Polnischen Senke. - Z. geol. Wiss., Berlin 7 (1979) 5, S. 601-615
- SCHWAB, G.; SÖLLIG, A.; TESCHKE, H.-J.: Zur Entwicklung der Spannungsverteilung im Tafeldeckgebirge der Mitteleuropäischen Senke. - Z. geol. Wiss., Berlin 7 (1979) 3, S. 315-332
- SCHWANDER, H.W.; BÜRGIN, A.; STERN, W.: Some geochemical data on stylolithes and their host rocks. - Eclogae geol. Helvetiae, Basel 74 (1981) 1, S. 217-224

- SCHWARZ, H.-U.: Zur Sedimentologie und Fazies des Unteren Muschelkalks in Südwestdeutschland und angrenzenden Gebieten. - 1970. - Tübingen, Univ., Diss. - 297 S.
- SEIDEL, G.: Saxonische Tektogenese. In: Geologie von Thüringen. - Leipzig: Hermann Haack Gotha, 1974. - 1000 S.
- SEIDEL, G.: Das Thüringer Becken. Geologische Exkursionen. - Geographische Bausteine, Leipzig/Gotha (1978) 11, 96 S.
- STACKEBRANDT, W.: Megaskopische Deformationsformen mesozoischer Sedimente im Bereich der Harznordrandstörung. - Z. geol. Wiss., Berlin 10 (1982) 5, S. 627-634
- STACKEBRANDT, W.: Beiträge zur tektonischen Analyse ausgewählter Bruchzonen der Subherzynen Senke und angrenzender Gebiete (Aufrichtungszone, Flechtinger Scholle). - 1983. - Potsdam, Zentralinst. Physik Erde, Diss. A (unveröff.)
- STILLE, H.: Die saxonischen Brüche. - Göttinger Beiträge zur saxonischen Tektonik. - Abh. Preuß. Geol. Landesanst., N. F., Berlin 95 (1923/25), S. 149-207
- SWIDROWSKA, J.: Styliolity tektoniczne jako wskaźnik tektonogenetyczny na obszarze południowo - zachodniego obrzeżenia - GOR SWIETOKRZYSKICH. - Przegl. geol., Warszawa 3 (1980), S. 159-164
- TESCHKE, H.-J.: Zur Tektonik des Leuchtenburggrabens (Thüringer Becken). Beitr. z. Tekt. d. Thür. Beckens II. - Abh. dt. Akad. Wiss. Berlin, Kl. Chemie, Geol. u. Biol., Berlin 1955 (1957) 10, S. 5-47
- TGL-Nr. 34331: Fachbereichstandard der DDR. "Regionalgeologische Gliederung" / Entwurf. - Berlin: Zentr. Geol. Inst., 1980. - Blatt 1-6
- THURM, H.; BANKWITZ, P.; BANKWITZ, E.; HARNISCH, G.: Rezente horizontale Deformationen der Erdkruste im Südostteil der Deutschen Demokratischen Republik. - Petermanns geogr. Mitt., Gotha/Leipzig 121 (1977) 4
- TOLLMANN, A.: Plattentektonische Fragen in den Ostalpen und der plattentektonische Mechanismus des mediterranen Orogens. - Mitt. österr. geol. Ges., Wien (1978) 69 (1976), S. 291-351
- TRAUTHEIM, I.: Feinstratigraphische und kleintektonische Untersuchungen im Unteren Muschelkalk der NIETLEBEN-LIESKAUER Muschelkalkmulde. - 1957. - Halle (Saale), Martin-Luther-Univ., Dipl.-Arbeit (unveröff.)
- TURNIT, P.: Morphologie und Entstehung diagenetischer Drucklösungserscheinungen. - Geol. Mitt., Aachen 2 (1967), S. 173-204
- TURNIT, P.; AMSTUTZ, G.: Die Bedeutung des Rückstandes von Druck-Lösungsvorgängen für stratigraphische Abfolgen, Wechsellagerungen und Lagerstättenbildung. - Geol. Rdsch., Stuttgart 68 (1979) 3
- TURNIT, P.: Die relative Druck-Löslichkeit detritischer Mineralien u. Gesteine. - Geologie, Berlin 18 (1969), S. 61-76
- VOIGT, H.: Feinstratigraphische und kleintektonische Untersuchungen des Unteren und Mittleren Muschelkalks in der Querfurter Mulde. - 1957. - Halle/Saale, Geol.-Paläont. Inst. Martin-Luther-Univ., Dipl.-Arbeit (unveröff.)
- VOWINKEL, E.: Gesteinsphysikalische und gefügekundliche Untersuchungen an Tonschiefern der Ardennen und ihre regionaltektonische Auswertung. - 1978. - Aachen, RWI, Diss. - 131 S.
- WÄCHTER, K.: Flechtingen-Roßblauer Scholle, Weferlingen-Schönebecker Triasplatte, Allertal-Störungzone. - Exkursionstagebuch Nr. 4. - Bergakad., Freiberg, Fernstudium, 1965. - 120 S.
- WAGENBRETH, O.: Entwurf einer abgedeckten geologischen Karte des Staßfurt-Oscherslebener Sattels und seiner tertiären Randsenken. - Geologie, Berlin 15 (1966) 9, S. 1009-1022

- WAGNER, G.H.: Über Klüfte und Horizontalstylolithen in Süddeutschland. -
Z. dtsh. geol. Gesell., Hannover 109 (1958), S. 276-277
- WAGNER, G.H.: Kleintektonische Untersuchungen im Gebiet des Nördlinger Rieses. -
Geol. Jb. Hannover 81 (1964), S. 519-600
- WAGNER, G.H.: Druckspannungsindizien in den Sedimenttafeln des Rheinischen Schildes. -
Geol. Rdsch., Stuttgart 56 (1967), S. 906-913
- WEHER, W.: Beiträge zur Entwicklung tiefer Bruchstrukturen in Mitteleuropa unter
besonderer Berücksichtigung Thüringens und deren Bedeutung für die saxonische
Mineralisation. -
1975. - Freiberg, Bergakad., Diss. (unveröff.)
- WEHER, W.: Zur Methodik der Lokalisierung und Charakterisierung tiefer Bruch-
strukturen für minerogenetische Untersuchungen. -
Freiberger Forsch.-H., Leipzig (1977) C 329, S. 9-52
- WENDLAND, F.: Mächtigkeits- und Faziesentwicklung der Leitbankzonen des Unteren
Muschelkalks im Südteil der DDR. -
Z. geol. Wiss., Berlin 11 (1983) im Druck
- WUNDERLICH, H.G.: Plattentektonik in kritischer Sicht. -
Z. dt. geol. Ges., Hannover 124 (1973), S. 309-328
- WUNDERLICH, H.G.: Die Bedeutung der Süddeutschen Großscholle in der Geodynamik
Westeuropas. -
Geol. Rdsch., Stuttgart 63 (1974) 2, S. 755-772
- ZIEGLER, P.A.: North. Sea Rift and Basin Development. In: I.B. RAMBERG; E.-R. NEUMANN
(Eds.): Tectonics and Geophysics of Continental Rift. -
Dordrecht: Reidel Publ. Comp., 1978. - S. 247-277

Zur kleintektonischen Analyse, Bewertung und Interpretation tektonischer Drucklösungserscheinungen

v. C.-H. Friedel^Y

Zusammenfassung

Die Bearbeitung und die kleintektonische Interpretation tektonischer Drucklösungserscheinungen wird durch die enge genetische Beziehung der Drucklösungserscheinungen zum tektonischen Flächeninventar bestimmt. - Auf diesen Aspekt und einige damit zusammenhängende Fragen wird in der vorliegenden Arbeit ausführlicher eingegangen. Vergleichende Felduntersuchungen, die im paläozoischen Schiefergebirge und im Tafeldeckgebirge durchgeführt wurden, bildeten die Grundlage dieser Arbeit. Die dabei erzielten Ergebnisse werden besonders im Hinblick auf die Ausbildung der Drucklösungserscheinungen dargestellt und diskutiert. Sie enthalten Aussagen zu verschiedenen Deformationselementen (Schieferung, Klüftung, Störungstektonik, spezielle Muschelkalkgefüge), ohne daß damit gleichzeitig eine umfassende und regionale Analyse erreicht und angestrebt wurde.

Drucklösungsvorgänge, in allen Stadien der Diagenese und postdiagenetisch wirksam, setzen bevorzugt und im allgemeinen auch cogenetisch im Zuge ruptueller Deformationsprozesse ein. Die Drucklösung trägt wesentlich zur Flächenbildung bzw. zur Entstehung von Teilbarkeiten bei (Klüfte, Schieferungsflächen). Insbesondere die bruchhafte Deformation ermöglicht einen ausgedehnteren Lösungstransport, wodurch eine wichtige Bedingung für das Wirksamwerden von Drucklösungsvorgängen erfüllt wird. Als Teil des tektonischen Flächeninventars entspricht die Ausbildung tektonischer Drucklösungserscheinungen (Suturflächen, Stylolithenrichtung) überwiegend dem Bau und der Anordnung dieses Flächeninventars. Die Orientierung der Stylolithen, als Merkmal einer gerichteten Kompression, ist jedoch kein ausreichendes Indiz zur Bewertung der Hauptnormalspannungen und zur Festlegung der Hauptkompressionsrichtung. Unter anderem können die spezifischen Bedingungen des Lösungstransportes die Ausrichtung der Stylolithen beeinflussen (gerichteter Lösungstransport). Nur in Verbindung mit weiteren, cogenetisch mit den tektonischen Drucklösungserscheinungen entstandenen Deformationselementen, welche eine derartige Festlegung auch ausreichend begründen, ist die Zuordnung einer stylolithischen Richtungsgruppe zur Hauptdruckrichtung möglich. Auch über die Raumlage der Hauptnormalspannungsachsen bzw. der Deformationsvektoren im Spannungselipsoid entscheidet in erster Linie das tektonische Flächengefüge, da die räumliche Orientierung der (H-)Stylolithen nicht stets die Lage dieser Achsen wiedergibt (Einfluß des sedimentären Gefüges).

Insgesamt ist die Bearbeitung tektonischer Drucklösungserscheinungen eine Auseinandersetzung mit grundsätzlichen Problemen. Sie betrifft unter anderem Fragen zur Klüftgenese sowie allgemein zu den Beziehungen zwischen Bruchbildung und Drucklösung (vgl. ARTHAUD & MATTAUER 1969, S. 743), zur Entstehungszeit und den Entstehungsbedingungen tektonischer Gefüge innerhalb der strukturellen Gesamtentwicklung (früh-, spätdiagenetisch; epirogen, tektogen) und zur Spannungsverteilung, unter der die verschiedenen Deformationsgefüge entstanden sind. Der Brauchbarkeit tektonischer Drucklösungserscheinungen für die Rekonstruktion der (Paläo-)Spannungsverteilung und zur Ermittlung der Hauptkompressionsrichtung sind Grenzen gesetzt. Das zeigte sich im paläozoischen Grundgebirge ebenso wie im Tafeldeckgebirge. Auf die teilweise überschätzte Bewertung dieser spezifischen Gefügeelemente hinzuweisen, ist deshalb ein wichtiges Anliegen dieser Arbeit

^Y VEB Fluß- und Schwerspatbetrieb Lengenfeld, Werk Ilmenau, 6305 Gehren

АННОТАЦИЯ

Обработка и микротектоническая интерпретация тектонических явлений выщелачивания при сжатии определяются тесной генетической связью явлений выщелачивания с тектоническим плоскостным инвентарем. Эти аспекты и связанные с ними вопросы основательно обсуждаются в данной работе. Основу данной работы образуют полевые исследования, проведенные в палеозойском сланцевом массиве и платформенном чехле. Добытые при этом результаты сообщаются и обсуждаются, учитывая в особенности образование явлений выщелачивания при сжатии. Они содержат показания к различным элементам деформации (сланцеватость, трещиноватость, тектоника возмущения, специальное строение раковинного известняка), в то же время, однако, не давая и не стремясь дать общий и региональный анализ.

Процессы выщелачивания при сжатии, эффективные во всех стадиях диагенеза, а также и в пост-диагенетических стадиях, возникают главным образом, а в общих чертах также и когенетически в ходе разрывных процессов деформации. Выщелачивание при сжатии существенно способствует образованию плоскостей или образованию отдельностей (трещины, сланцевые плоскости). В особенности изломная деформация способствует широкому переносу процессов растворения, чем осуществляется важное условие эффективности процессов выщелачивания. Как часть тектонического плоскостного инвентаря, образование тектонических явлений выщелачивания при сжатии (шовные плоскости, направление стилолитов) преобладающе соответствует строению и расположению этого плоскостного инвентаря. Ориентирование стилолитов, как признак направленного сжатия, однако не является достаточным показателем для оценки основного нормального напряжения и для определения направления главной силы сжатия. Между прочим, специфические условия и перенос процессов растворения могут влиять на направление стилолитов (направленный перенос процессов растворения). Только в соединении с другими, возникшими когенетически с тектоническими явлениями выщелачивания при сжатии, элементами деформации, которые могут основательно мотивировать подобные определения, возможно подразделение стилолитических групп одинаковой ориентировки к главному направлению сжатия (давления). Пространственное расположение оси главного нормального напряжения или векторов деформации в эллипсоиде напряжений в первую очередь зависит от линии тектонического строения плоскости, так как пространственная ориентация (Н-)стилолитов не всегда отражает расположение этих осей (влияние осадочной структуры).

В общей сложности обработка тектонических явлений выщелачивания при сжатии является разбором основных проблем. Она, между прочим, касается вопросов генезиса растрескивания, а также в общих чертах отношений между образованием трещин и выщелачиванием при сжатии (см. АРТАУД и МАТТАУЕР, 1969, стр. 748), времени образования тектонических структур в рамках общего структурного развития (генетически рано и поздно, эпейрогенетически, тектогенетически) и распределения напряжения, при котором образовались различные структуры деформации. Полезность тектонических явлений выщелачивания при сжатии для реконструкции распределения (палео)напряжений и для определения главных направлений сжатия (давления) имеет свои границы. Это видно по палеозойскому основному массиву, а также по платформенному чехлу. Поэтому важной задачей этой работы является указание на частично преувеличенную оценку этих специфических структурных элементов.

Summary

The treatment and the microtectonic interpretation of tectonic pressure-solution phenomena are determined by the close genetic relationship between the pressure-solution phenomena and the tectonic surface inventory. This aspect as well as some questions related to it are dealt with in greater detail in this paper. The work was based on comparative investigations carried out in the Paleozoic slate rock and in the platform cover. The results obtained are presented and discussed especially with regard to the formation of pressure-solution phenomena. They contain information concerning various elements of deformation (foliation, jointing, fault tectonics, special shelly limestone structures), but without a comprehensive and regional analysis having been achieved nor attempted either.

Pressure-solution phenomena, being effective in all stages of diagenesis as well as post-diagenetically, appear preferably, and in general also cogenetically, in the course of ruptural deformation processes. Pressure solution essentially contributes to plane formation and to the formation of cleavages (joints, foliation planes). Especially ruptural deformation enables a more extensive transport of solution to take place, which satisfies an important condition for pressure-solution processes to come into effect. As a part of the tectonic surface inventory, the formation of tectonic pressure-solution phenomena (suture surface, stylolite orientation) mainly corresponds to the structure and the arrangement of this surface inventory. The orientation of the stylolites, as a characteristic feature of directional compression, is not, however, a sufficient piece of evidence for the evaluation of the principal normal stress and for the determination of the principal direction of compression. Among other things, the specific conditions of the solution transport may influence the orientation of the stylolites (directional solution transport). To associate a group of stylolitic orientations to the principal direction of compression is only possible in connection with other elements of deformation, which are generated cogenetically with the tectonic pressure-solution phenomena and give adequate support to the way in which the orientations are associated. The spatial orientation of the principal normal stress axes and of the strain vectors in the stress ellipsoid is also mainly determined by the tectonic structure of planes, because the spatial orientation of the (H-)stylolites does not always represent the orientation of these axes (influence of the sedimentary structure).

Taken as a whole, dealing with tectonic pressure-solution phenomena means tackling fundamental problems. Among other things this concerns problems of joint genesis as well as, generally, problems concerning the relations between fracturing and pressure solution (cf. ARTAUD and MATTAUER, 1969, p. 743), the time and the conditions of the generation of tectonic fabrics within the overall structural evolution (early or late diagenetic, epirogenic, tectogenic), and problems of the stress distribution under which the different deformation fabrics were formed.

There are limits to the usefulness of tectonic pressure-solution phenomena for the reconstruction of the (paleo-)stress distribution and for the determination of the principal direction of compression. This was observed for both the Paleozoic basement and the platform cover. Therefore it is an important point in this paper to point out that the evaluation of these specific fabric elements has in part been overestimated.

1. Einleitung

Drucklösungsvorgänge und ihre charakteristischen Erscheinungsformen erfuhren in den letzten zwanzig Jahren eine zunehmende Beachtung. Motiviert wurden und werden die zahlreichen Forschungsarbeiten durch die vielschichtige geologische Bedeutung dieser Vorgänge. Entsprechende Untersuchungen umfassen z.B. Aussagen zur Lagerstättenbildung (AMSTUTZ & PARK 1967, HORTENBACH 1977, TRURNIT & AMSTUTZ 1979 u.a.). Sie tragen weiterhin zur genetischen Interpretation sedimentärer Abfolgen (TRURNIT 1968) und bestimmter Gesteinslithotypen bei (für Kalkknollengesteine siehe GRÜNDEL & RÖSLER 1963, RICHTER 1965, P. WEBER 1965, WALD u.a. 1983) und leisten u.a. seit den Publikationen von WAGNER (1964 und 1967) einen größeren Beitrag zur Paläospannungsanalyse. Die vorliegende Arbeit setzt sich vor allem mit den Problemen auseinander, die im Zusammenhang mit der kleintektonischen Bewertung tektonisch geprägter Drucklösungserscheinungen (tektonische Drucklösungserscheinungen) stehen. Es wird versucht, die Voraussetzungen und damit die Möglichkeiten und Grenzen einer solchen Bewertung darzustellen. Erste Grundzüge dieser Arbeit sind in einem unveröffentlichten Bericht niedergelegt (FRIEDEL 1984). Darauf aufbauend wurden weitere und ergänzende Untersuchungen durchgeführt. Das Ziel dieser Untersuchungen bestand nicht in einer vollständigen Bearbeitung einzelner geologischer Einheiten, sondern darin, die festgestellten Erscheinungen in den verschiedenen Einzelaufschlüssen unter gleichem Aspekt zu beurteilen. Die Feldarbeiten begannen in variszisch deformierten paläozoischen Karbonatkomplexen. Sie wurden im weiteren Verlauf der Untersuchungen auf das Tafeldeckgebirge ausgedehnt. Die in paläozoischen Gesteinen erzielten Ergebnisse waren dabei auch für die Bearbeitung der jüngeren Sedimentkomplexe von Interesse. So lieferten sie erste Anhaltspunkte für eine kritische Betrachtung einiger in Tafelgebieten gewonnener Befunde. Auf Grund der Vielfalt der hier behandelten tektonischen Erscheinungen (Schieferung, Klüftung, Störungstektonik) ist die vorliegende Arbeit als Zwischenbilanz zu verstehen, in der gleichzeitig einige Anregungen für weitere Untersuchungen vermittelt werden sollen.

2. Tektonische Drucklösungsgefüge in paläozoischen Schiefergebirgskalken

Die Feldaufnahmen wurden in verschiedenen Grundgebirgseinheiten der DDR durchgeführt. Sie erfolgten vorwiegend im Thüringischen Schiefergebirge (obersilurische Ockerkalke der Frankenwälder Querzone, Oberdevonkalke am NW-Rand des Bargaer Sattels), im Unterharz (Elbingeröder Riffkomplex, Herzynkalke), im vogtländischen Raum und im Wildenfels-Zwischengebirge (vorwiegend oberdevonische Flaserkalke). Gegenstand der Untersuchungen waren demnach massige Riffkalke und Flaserkalke in unterschiedlicher Ausbildung.

Den Aufschlüssen gemeinsame und für die Aufgabenstellung wesentliche Deformationselemente sind Falten (ss-Falten), Klüfte, insbesondere aber die zumeist deutliche Schieferung (Transversalschieferung, s_1). Nach den vorherrschenden Gefügeelementen können die Aufschlüsse insgesamt dem normalen Schiefergebirge im Sinne von SCHROEDER (1958, 1966, vergl. auch BANKWITZ & SCHROEDER 1963) zugeordnet werden. Die Kalksteinkomplexe wurden durch die tektogenen Prozesse nicht nur erheblich verfaltet, sondern auch mehr oder weniger deutlich geschiefert. Eine Analyse der Drucklösungserscheinungen in geschieferten Kalksteinen wird damit maßgeblich durch die von FLESSMANN (1964) und RICHTER (1965) im Schiefergebirge erzielten Ergebnisse bestimmt. Die genannten Autoren lenkten erneut die Aufmerksamkeit auf die Bedeutung der Drucklösungsvorgänge für den Schieferungsprozeß. Sie konnten in verschiedenen Schiefergebirgskomplexen eindeutig nachweisen, daß karbonatische Bestandteile der Gesteine (Fossilien u.ä.) entlang der Schieferungsflächen angelöst bzw. teilweise weggelöst waren. Diese synkinemati-

schen Lösungsvorgänge kennzeichnen die Schieferungsflächen als wichtige Drucklösungsbahnen. Charakteristische Merkmale der Flächen sind die Anreicherung dunklen annähernd karbonatfreien Residualbelages (bes. Tonmineralien, RICHTER 1965, SCHNEIDER 1977 u.a.), Lösungsabsätze und öfters auch die stylolithische Ausbildung der Schieferungsflächen.

Der Nachweis der Drucklösungsvorgänge auf Schieferungsflächen beeinflusste auch die Diskussion um den mechanischen Charakter der Schieferung (vgl. BANKWITZ 1965). Für die Aufschlußgruppen innerhalb der hier untersuchten Arbeitsgebiete finden die vorherrschenden Auffassungen - Druck senkrecht zur Hauptebene der Schieferung (Unterharz: ZÖLLICH 1939, SCHWAB 1976; Thüringisches Schiefergebirge: SCHROEDER 1966; Wildenfelser Zwischengebirge: SCHREIBER 1967) -, ihre grundsätzliche Bestätigung auch in den an die Schieferung gebundenen Drucklösungserscheinungen.

In den bearbeiteten Aufschlüssen können die mit der Schieferung verbundenen Drucklösungserscheinungen unterteilt werden in

- schräg bis banknormal stehende, im ss-Anschnitt sich netzförmig verzweigende Drucklösungsflächen (Tafel 1) und in
- stylolithische Bankungsfugen. Deren Stylolithenachsen sind parallel zur Transversalschieferung "s₁" ausgerichtet (Tafel 4). Diese Formen werden als "V_{s₁}-Stylolithenflächen" und die zugehörigen Stylolithen als "V_{s₁}-Stylolithen" bezeichnet (Kap. 2.2.).

2.1. Zur Ausbildung der Schieferungsflächen

Die untersuchten, gut gebankten Flaserkalke zeichnen sich durch die teilweise sehr engmaschige Vergitterung zahlreicher Drucklösungsflächen aus (schichtparallele und zur Schichtung steil einfallende Suturflächen), die dem Gestein im Kluftanschnitt das für Flaserkalke typische Gepräge geben (Tafel 2, vgl. auch WALD u.a. 1983). Die Ausrichtung der schichtinternen Lösungsbahnen ist gegenüber dem Kluftbild auf den Schichtoberflächen relativ uneinheitlich. Eine für Schieferungsflächen in vielen Fällen charakteristische, streng parallele Anordnung, wie sie beispielsweise schichtparallel eingelagerte, tonreiche Schieferlagen aufweisen, fehlt häufig in den Kalksteinbänken. Ebenso spricht das oft zu beobachtende banknormale Einfallen der Flächen nicht unmittelbar für eine auf Schieferung zurückgehende Flächenbildung. So kam es auch zu unterschiedlichen Deutungen dieser Gefügebilder.

In neuerer Zeit untersuchten KUPETZ, zit. in WALD 1981) und WALD (1981) das Gefüge der Flaserkalke im Arbeitsgebiet. Obwohl bestimmte Beziehungen zur Schieferung bereits festgestellt wurden, führten sie die Anlage des mauerartig und schichtig-breziös den Kalkstein durchsetzenden Drucklösungsgefüges im wesentlichen auf eine zunehmende Zerklüftung und das Zerbrechen der Gesteinsschichten durch schichtparallele Translation zurück (Flaserkalke der Typen A und B, WALD 1981, s. WALD u.a. 1983). Die Suturierung der Schichtflächen wurde durchweg als Ausdruck der diagenetischen Verfestigung gewertet, die sich noch vor der Herausbildung der bankinternen Lösungsflächen vollzog (vgl. Kapitel 2.2.).

Dagegen konnten vom Autor z. B. in dem von KUPETZ bearbeiteten Karbonatkomplex des Wildenfelser Zwischengebirges zahlreiche Übergänge zwischen dem mauerartigen und dem besser als Schieferung erkennbaren Gefüge nachgewiesen werden. Schieferungsbrechung spielt dabei ebenso eine Rolle wie die Position der Flächen innerhalb der geschieferten Faltenkomplexe (Flanken- und Scharnierbereich, s. Abb. 1 und Tafel 3). Besonders in Annäherung und innerhalb der Faltscharniere tritt die Schieferung durch ihre typischere Ausbildung deutlicher hervor. Die Abbildung 1 zeigt den allmählichen Übergang von banknormal stehenden Flächen im Faltschenkel zu stärker spitzwinklig angeordneten "typischen" Schieferungsflächen im Faltscharnier. Dabei

verändert sich auch die im ss-Anschnitt erkennbare Anordnung, indem sich eine stärkere subparallele Regelung des Flächengefüges einstellt (Bild 2 in Tafel 3).



Abb. 1 Übergang vom mauerartig ausgebildeten Flaserkalkgefüge im Faltenschenkel zum charakteristischer geschiefertem Gefügebild im Faltenscharnier. Stillgelegter Steinbruch Häslich, Wildenfelsler Zwischengebirge (vgl. Bild 1 in Tafel 3).

Das durch die dunklen Drucklösungssäume gut erkennbare Flächengefüge dieser Aufschlüsse entstand, trotz seiner für Schieferung oftmals recht untypischen Ausbildung (Schieferungsklüftung), zum größten Teil als Ergebnis der Schieferungsdeformation. Darauf verweisen nicht nur die dargestellten Übergänge. Es gibt weiterhin deutliche Belege dafür, daß sowohl die Drucklösungserscheinungen auf den Schichtfugen (Bild 4 in Tafel 4, V_{S1} -Stylolithen) als auch die brekziösen Einlagerungen (Tafel 3) durch die Wirksamkeit der Schieferung geprägt wurden (vgl. Kap. 2.3.).

Für die Untersuchungen besonders aufschlußreich war die Analyse der stylolithisch ausgebildeten Flächen und speziell die Ermittlung der bevorzugten Ausrichtung der Stylolithen auf den Schieferungsflächen. So konnte zuerst in den daraufhin ausführlicher untersuchten Aufschlüssen im Obersilurischen Ockerkalk der Frankenwälder Querzone eine in dieser Weise nicht erwartete Ausrichtung der Stylolithen festgestellt werden, die darüber hinaus auch für die anderen Kalksteinareale ein charakteristisches Merkmal darstellt. Zu den auffallendsten und dominierendsten stylolithischen Bildungen in der

genannten Aufschlußgruppe gehören schräg bis banknormal stehende, bankinterne Lösungsflächen (Schieferungsflächen) mit parallel zur Schieferung ausgerichteten Stylolithenachsen. Die Suturen weisen damit eine Regelung der Stylolithenachsen auf, die auch für die V_{s_1} -Stylolithenflächen kennzeichnend ist und wodurch die engen Beziehungen zwischen diesen Gefügeelementen im Rahmen der Drucklösungsvorgänge hervorgehoben werden (vgl. Kap. 2.2.). Die schieferungsparallele Orientierung der Stylolithenachsen zeigt sich auf den Schichtoberflächen durch ihre strenge Parallelität zum s_1 -Lineargefüge (O_1 -Lineation bzw. Runzelung, eingeregelter Konkretionen u.a.; s. Tafel 1, Bild 1 u. 2). Auch quer zur Schieferung ausgerichtete Stylolithen sind vorhanden. Sie treten aber nur untergeordnet auf. Faßt man die unterschiedliche Orientierung der Stylolithen von Schieferungsflächen im Gefügediagramm zusammen, so weisen die Stylolithenachsen insgesamt eine orthogonale, auf die Hauptdeformationselemente (Faltenachse, s_1 -Hauptebene) beziehbare Richtungsverteilung auf. Dabei liegt jedoch weder eine in Richtung der stärksten Einengung vorherrschende noch eine gleichwertige Anzahl quer und längs dazu orientierter Stylolithen vor. Im Schichtflächenanschnitt überwiegen eindeutig schieferungsparallel ausgerichtete Stylolithen (Abb. 2). Weicht die Lage der Schieferungsflächen lokal stärker vom Faltenbau ab, so wird der einzig bestimmende Einfluß der Schieferungsdeformation für die Ausrichtung der Stylolithen besonders deutlich (Abb. 3, Diagr. 4 mit B/s_1 -Abweichung). Analog dazu richten sich auch die Suturen gesetzmäßig zur O_1 -Lineation und nicht zum Faltengefüge aus ($hkO-s_1$ -Flächen, Diagr. 4). Eine derartig betont schieferungsparallele Suturen bankinterner Drucklösungsflächen konnte prinzipiell in allen transversal geschieferten Kalksteinvorkommen nachgewiesen werden (devonische Flaserkalke, Riffkalke; Abb. 2, Diagr. 5 u. 6). Unterschiedlich ist dabei allerdings der Regelungsgrad der Stylolithenachsen. Nach bisherigen Beobachtungen zeigen die stärker geschieferten Flaserkalke, deren größere Beanspruchung sich besonders in einer zunehmenden gesteinsinternen Gefügeregelung äußert (Ockerkalke, verschiedene Devonkalke), eine einheitlichere, streng schieferungsparallele Ausrichtung der Drucklösungszapfen. In den teilweise nur relativ schwach geschieferten Flaserkalken der Wildenfels-Aufschlüsse ist die Regelung der Stylolithen dagegen geringer (Abb. 2, Diagr. 6). Tritt die Transversalschieferung lokal deutlicher hervor, scheint sich auch hier eine größere Regelung einzustellen (vgl. Bild 5 und 6 in Tafel 1).

Detailstudien in stärker intern geregelten Kalksteinvorkommen (interne Schieferungsdeformation) sollen verdeutlichen, wie stark besonders die stylolithisch ausgebildeten Lösungsflächen durch das z. T. latente, interne Schieferungsgefüge geprägt werden (Abb. 3). Gegenüber den netzförmig verzweigten Suturenflächen folgen die Stylolithen streng dem s_1 -Internegefüge. Die Stylolithen werden lokal entlang feiner, zum Internegefüge parallel verlaufender Lösungsbahnen stärker ausgelängt. Die quer zum Internegefüge durchsetzenden Suturen gehen sogar abschnittsweise in diese Position über und können dann auch quer zur Schieferung stylolithisch durchdrungen sein (Übergangsformen, ss-Anschnitt!). Die Entstehung bestimmter Zapfenformen wird maßgeblich durch die jeweilige Position der Suturenflächen und durch die Wirksamkeit des internen Schieferungsgefüges beeinflusst bzw. vorgezeichnet (Abb. 3a). Bezieht man den größeren Regelungsgrad der Stylolithen in intensiver (intern) geschieferter Partien bzw. Vorkommen mit ein, so stellt sich die bevorzugt schieferungsparallele Orientierung der Stylolithen insbesondere als ein Ergebnis der spezifischen, durch das Internegefüge bestimmten Bedingungen des Lösungstransportes dar (gerichteter Lösungstransport).

Die Altersbeziehungen der suturierten Flächen untereinander lassen eine zeitlich getrennte Entwicklung nicht erkennen. Mit den schieferungsparallel suturierten Stylolithenflächen entstanden auch mit Residualbelag besetzte, ebene Schieferungsflächen sowie mit Kalzit gefüllte Fugen. Die ebenen Suturenflächen begrenzen die schräg dazu angeordneten Drucklösungsflächen, sie setzen aber auch an ihnen ab. Auch Flächen mit rechtwinklig zur Schieferung ausgerichteten Stylolithen sind nach den wechselnden Altersbeziehungen und den beobachteten Übergangsformen gemeinsam mit den übrigen Suturenflächen entstanden (Abb. 3a und 3b). Gleiches gilt auch für die überwiegend in s_1 -Flächenlage befindlichen Kalzitfugen. Auf ihre Zugehörigkeit zu den suturierten Gefügeelementen verweisen an ihnen einseitig absetzende Suturen und Übergänge zu stylolithischen Flächenformen (Abb. 3c).

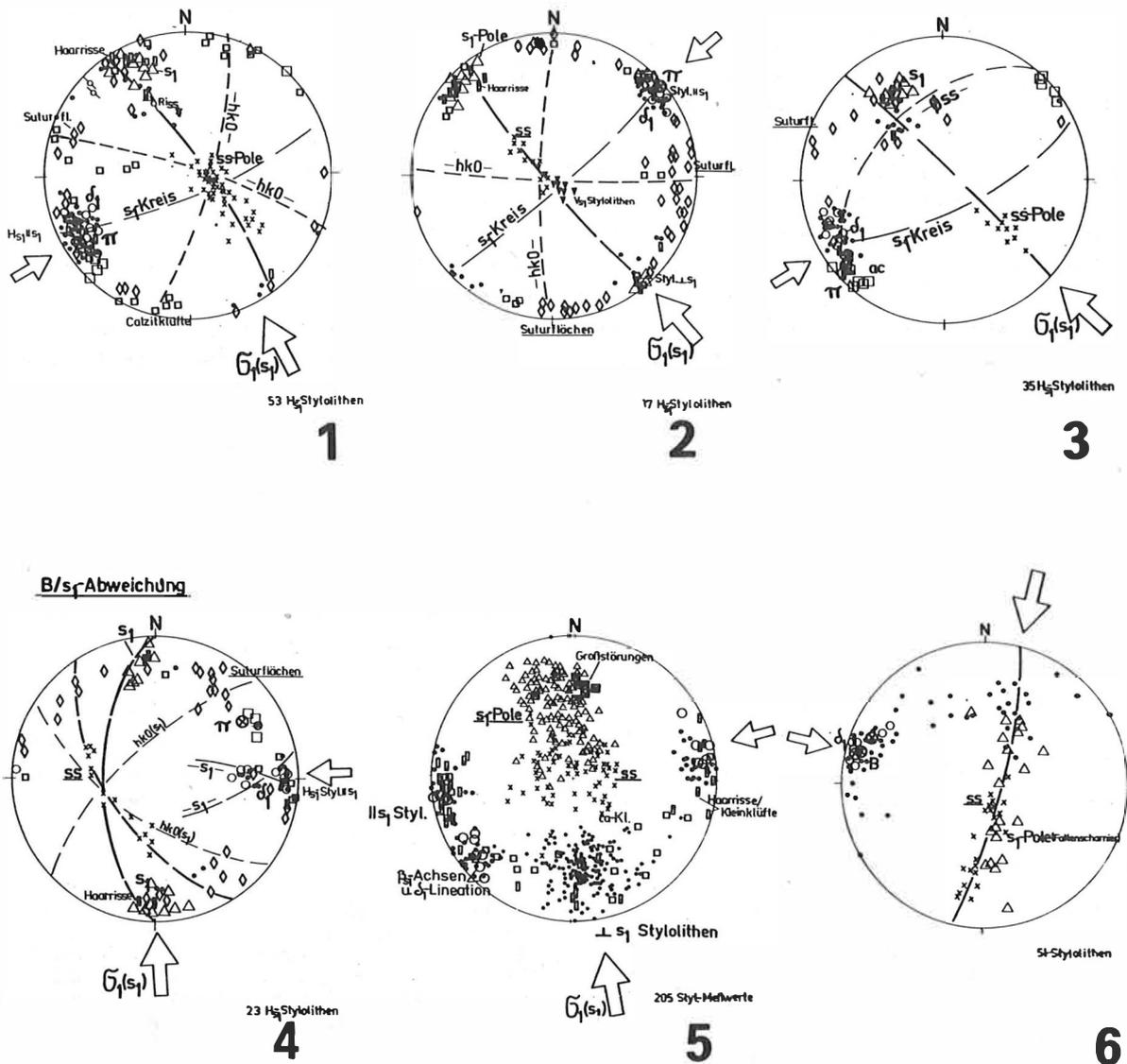


Abb. 2 Gefügediagramme aus geschieferten und durch Drucklösungserscheinungen gekennzeichneten Vorkommen.

Diagr. 1: Schatzberg bei Wittgendorf, Diagr. 2: Steinbruch im Ostteil von Döschnitz, Diagr. 3 u. 4: Steinbrüche südlich Garsndorf nahe den "Feengrotten"/Saalfeld - Westteil des Thüringischen Schiefergebirges (Frankenwälder Querzone). Diagr. 5: Synoptisches Gefügediagramm aus 9 Aufschlüssen im Elbingeröder Riffkomplex/Harz. Diagr. 6: Steinbr. Häslich, Wildenfeler Zwischengebirge. Die Diagramme zeigen eine orthogonale, aber betont schieferungsparallele Ausrichtung der Stylolithenachsen. Der Hauptteil der Stylolithenachsen verläuft nicht parallel, sondern rechtwinklig zur Hauptkompressionsrichtung der Schieferungsdeformation (σ_1 / s_1 , größte Hauptnormalspannungsachse der Schieferung). Neben der Stylolithenrichtung (Punkte) sind weitere wesentliche Gefügeelemente dargestellt (Legende s. Einzeldiagramme).

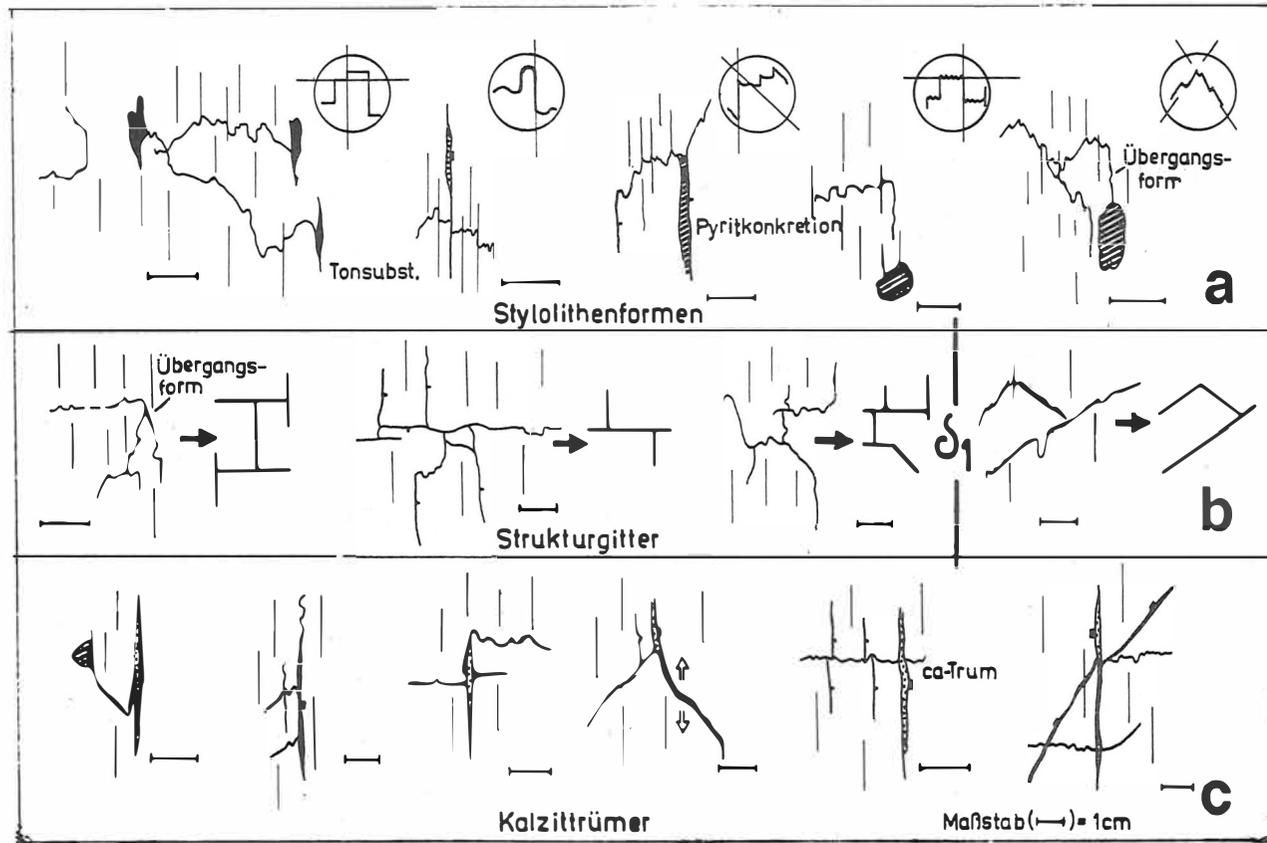


Abb. 3 Durch ihre Beziehungen zum internen Schieferungsgefüge (D_1 -Lineation) und durch ihre charakteristische Ausbildung gekennzeichnete Gefügebilder in Schiefergebirgskalken. Sie gelten als Kriterien für synkinematisch zur Schieferungsdeformation entstandene Drucklösungsgefüge. a: s_1 -geprägte Stylolithenformen, b: Strukturgitter und Altersbeziehungen der Drucklösungsflächen, c: Kalzittrümer in Verbindung mit Stylolithenflächen. Weitere Erläuterungen im Text.

Neben den hier und weiter oben genannten Beobachtungen unterstützt die recht einheitliche Ausrichtung der Stylolithenachsen auf den Flächen die vom Verfasser vertretene Auffassung, das netzförmig angeordnete Flächengefüge insgesamt als ein durch Schieferungsdeformation geprägtes Flächenensemble und letztlich als (sichtbaren) Ausdruck der Schieferung selbst anzusehen. Dabei kommt dem bruchhaften Materialverhalten, vor allem in Abhängigkeit vom primären Anteil toniger Bestandteile, eine größere Bedeutung zu (Kap. 2.3.).

Es sei an dieser Stelle an die Ausführung von RICHTER (1965, S. 243) erinnert. Innerhalb einzelner, dem Schieferungskomplex eingelagerter Kalkbänke stellte er neben Brechungserscheinungen in den Kalkbänken auch eine zum Gesamtgefüge uneinheitlichere Anordnung der s_1 -Flächen fest. Entsprechend besitzen die hier beobachteten, schichtparallel eingelagerten Schieferbänke gegenüber den Kalkbänken ein straff geregeltes s_1 -Flächengefüge. Weitere gute Vergleichsmöglichkeiten zur Ausbildung von Schieferungsflächen boten auch die zahlreichen Angaben in BORRODAILE u.a. (1982, s. Abb 66, 67 u.a.).

Eine besondere Beachtung verdient auch der Kluftanschnitt der bankinternen Suturflächen. Im Anschnittsbild zeigen sowohl banknormal stehende als auch zur Schichtung deutlicher geneigte Schieferungsflächen eine schichtparallele stylolithische Verzahnung (schichtungskonform durchdrungene Stylolithenachsen, vgl. Tafel 2). Bei zur Bankung stärker geneigter Flächenlage beeinflusst die Schichtung zumindest lokal die stylolithische Suturierung dieser Flächen. Daß dabei allein aus dem Kluftanschnitt heraus noch nicht auf die Richtung der wirksamen Kräfte geschlossen werden kann, verdeutlichen die für verschiedene Flächenpositionen dargestellten, bei Stylolithenflächen eintretenden geometrischen Effekte (Abb. 4).

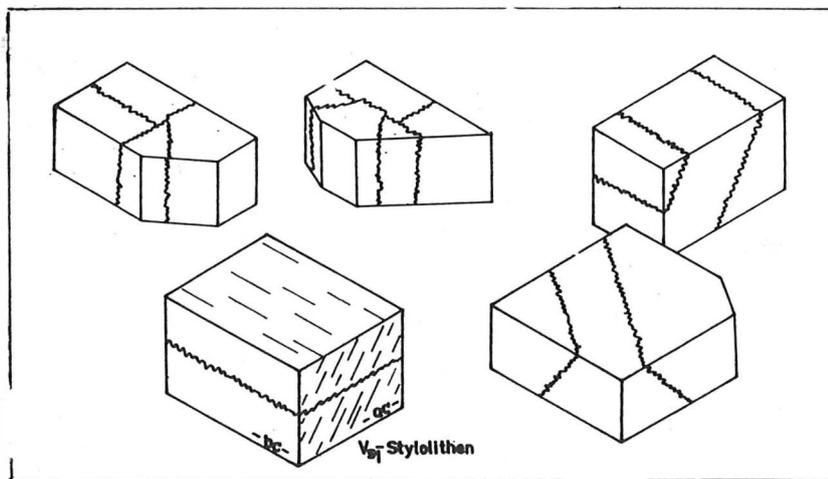


Abb. 4 Mit der Lage des Anschnittes verändert sich bei Stylolithenflächen auch das Anschnittsbild. Es wird eine scheinbare Ausrichtung der Stylolithen vorge-täuscht. V_{s_1} -Stylolithen erscheinen z. B. im bc-Anschnitt als "normale", streng vertikal stehende V-Stylolithen.

Unabhängig von diesen geometrischen Effekten ist die häufig schichtungskonforme Durchdringung der Stylolithenachsen bemerkenswert, da die Anlage der Schieferungsflächen erst nach einer gewissen, hier im einzelnen nicht näher bestimmten Schichtverbiegung erfolgte.

Die Raumlage der Schieferungsflächen innerhalb der gefalteten Gesteinskomplexe entspricht insgesamt der für Transversalschieferung charakteristischen divergenten Anordnung. Sie steht in Fächer- und Meilerstellung (Schieferungsdivergenz, ENGELS 1959) und weist zumeist eine der Faltenachsebene angepaßte Hauptvergenz auf. Eine vertikale und gleichzeitig banknormale Ausgangslage der schichtungskonform durchdrungenen Stylolithenflächen, wie sie in anderen Fällen beschrieben oder angenommen wird (GROSHONG 1975a, HELMSTAEDT & GREGGS 1980), ist hier zwar im Einzelfall möglich, kann aber im ganzen ausgeschlossen werden. Gegen eine nachträgliche Rotation aus dieser Ausgangslage spricht zusätzlich die stylolithische Suturierung der Schichtflächen (V_{s1} -Stylolithenflächen). Auch Modellvorstellungen zur Spannungs- und Strainverteilung während der Faltenbildung, die u. a. die (zeitlich-modifizierte) Anordnung der Schieferungsflächen verständlich machen (GROSHONG 1975b, BANKWITZ 1977), liefern hierfür noch keine ausreichende Erklärung.

Nach den eigenen Beobachtungen äußert sich in der schichtungskonformen oder lokal die Schichtung nachzeichnenden stylolithischen Durchdringung der Schieferungsflächen der ausrichtende Einfluß des sedimentären Gefüges. Im Muschelkalk wird dieser Einfluß des Schichtgefüges auf die Lage der Stylolithenachsen bei Schrägschichtung besonders deutlich (Tafel 7, Bild 4). Weitere, mit dem Schieferungsphänomen im Schiefergebirge vergleichbare Beispiele aus mesozoischen Kalksteinvorkommen liefern ähnliche Ergebnisse. Nach den Untersuchungen von LANGHEINRICH & FLESSMANN (1968) in Turonkalken des Lichtenberger-Salzgitterer Sattels ist die erst im Spätstadium der Schichtverbiegung entstandene s-Flächenschar bei banknormaler Stellung ebenfalls schichtparallel (schichtungskonform) stylolithisch durchdrungen.

Derartige schichtungskonform durchdrungene Stylolithen beim Schieferungsgefüge wurden vom Verfasser in dem dieser Ausarbeitung vorausgehenden Bericht als H_{s1} -Stylolithen bezeichnet (FRIEDEL 1984, Kap. 2.1.1.). Obwohl eine derartige Suturierung in verschiedenen Vorkommen eine recht charakteristische Erscheinung ist (vgl. Tafel 2 und 3), gilt sie jedoch für die Ausbildung der Schieferungsflächen nicht allgemein. Insbesondere in Bereichen, in denen die Schieferungsflächen stärker zur Schichtung geneigt sind und/oder in Aufschlüssen mit stark unterdrücktem Primärgefüge (z.B. Elbingeröder Komplex), ist der Einfluß der Schichtung nur noch lokal oder nicht mehr nachzuweisen. Da Übergänge zwischen den senkrecht und den stärker schräg gestellten Schieferungsflächen bereits durch Brechungseffekte hervorgerufen werden, behält die oben getroffene Aussage über die Anlage schichtungskonform suturierter Flächen durchaus ihre Gültigkeit. Sie entstanden erst, als die Schichtverbiegung bereits begonnen hatte.

Auch feine, kaum einen Millimeter starke und sich bei Kalzitfüllung leicht heraushebende "Haarrisse" beeinflussen die Ausbildung der Drucklösungsflächen (Abb. 5). Ihrer Anlage nach sind diese Haarrisse überwiegend älter als die markanten Suturflächen, doch weist ihre Anordnung in deutlich geschieferten Gesteinen engere Beziehungen zum Schieferungsgefüge auf (vgl. Abb. 4). In diesen Vorkommen könnten sie dem Schieferungsprozeß unmittelbar angehören. Ausführlich wurden u. a. die Beziehungen zwischen der Ausbildung des Drucklösungsgefüges und der Wirksamkeit feiner Rupturen in geschieferten Kalksteinen von GEISER & SANSONE (1981) dargestellt.

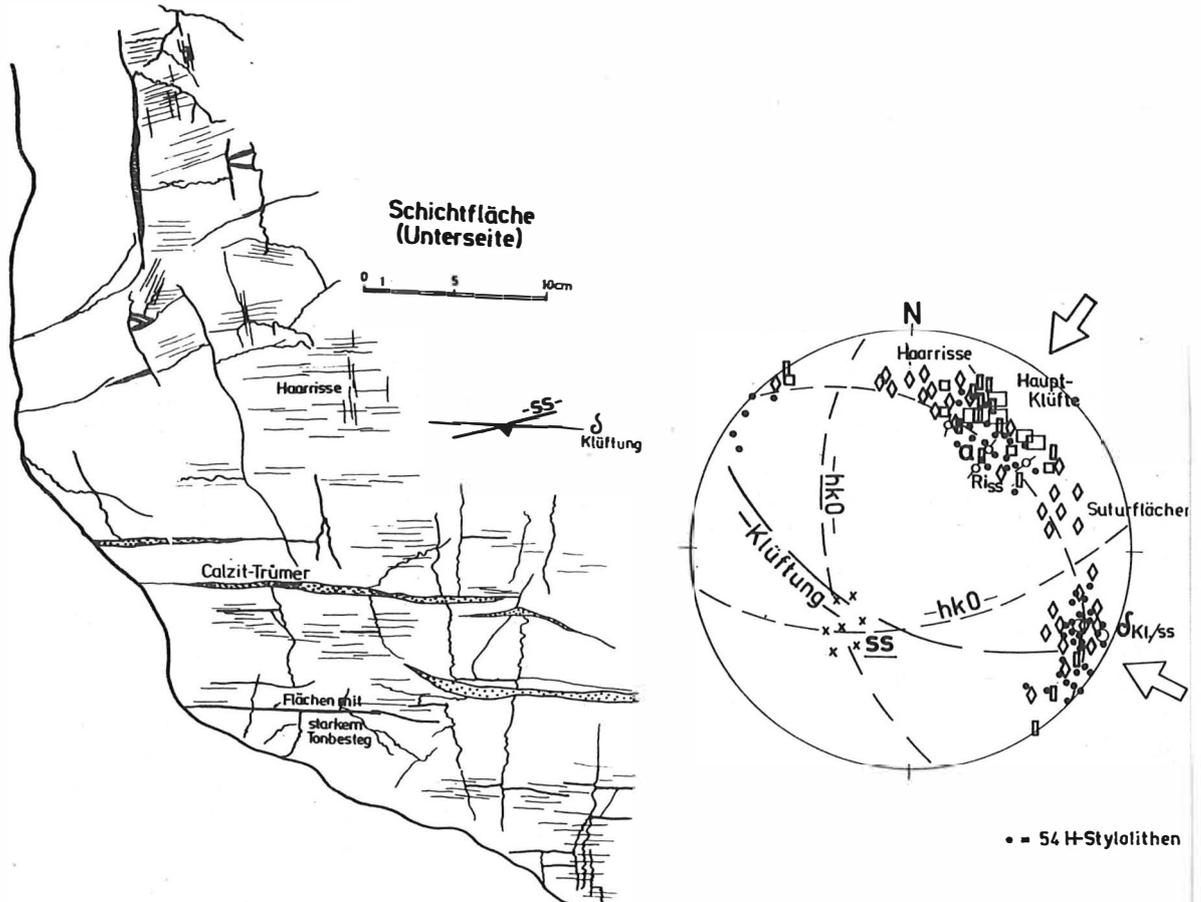


Abb. 5 Detailbild einer Schichtfläche (Unterseite) mit zugehörigem Gefügediagramm (feinlagiger Kalkpelit im Elbingeröder Riffkomplex bei Rübeland). Die wechselseitige Vergitterung der Suturflächen und die orthogonale Ausrichtung der Stylolithen sprechen für eine gemeinsame, annähernd einzeitige Entstehung des Drucklösungsgefüges. Die Stylolithenzapfen wurden in ihrer Ausrichtung teilweise durch ältere "Haarrisse" beeinflusst.

2.2. Tektonisch beeinflusste Drucklösungsvorgänge auf Schichtflächen (V_{S1} -Stylolithenflächen)

Die Schichtung eines Sedimentgesteines stellt für die Drucklösungsprozesse eines der wichtigsten Gefügemerkmale dar. Die Schichtflächen ermöglichen einen ausgedehnten Lösungstransport, der nach den Vorstellungen von TRURNIT u.a. bis zur ausgeprägten Materialsonderung führen kann (TRURNIT 1967, 1968; TRURNIT & AMSTUTZ 1979).

Die Schichtflächen zeigen häufig eine deutliche stylolithische Suturierung. In den postvariszischen, so in den gut untersuchten mesozoischen Kalksteinen, sind die Stylolithen meistens streng vertikal zur Schichtung orientiert. WAGNER (1964, S. 532 f) schuf deshalb für diese Formen den Begriff "Vertikalstylolithen", V-Stylolithen. Die Entstehung der Vertikalstylolithen wird allgemein auf den Überlagerungsdruck der hangenden Gesteinsfolgen zurückgeführt. Dabei kann bereits bei geringer Mächtigkeit der überlagernden Gesteine die Stylolithenbildung auf Schichtflächen einsetzen (in miozänen Karbonaten z.B. ab etwa 90 m, s. BUŠINSKIJ 1961, S. 49). Über die Bildungszeit der V-Stylolithen bestehen allerdings noch unterschiedliche Auffassungen. So werden

bezüglich der Drucklösungsvorgänge auf tektonischen Flächen von der Mehrzahl der Bearbeiter V-Stylolithen als ältere Bildungen angesehen (u.a. WAGNER 1964, S. 535; TRURNIT 1968, S. 381; FLESSMANN 1972, S. 336). Doch weisen auch einige Autoren auf gegenteilige Altersbeziehungen hin (z.B. BEIERSDORF 1969, S. 224; PARK & SCHOT 1968, S. 181; FRIEDEL 1984, Kap. 3.2.2.). Besonders eindrucksvoll zeigen ARTHAUD & MATTAUER (1972), daß Drucklösungsvorgänge auf Schichtfugen unmittelbar mit rupturellen Deformationsereignissen verbunden sein können. Aus gefalteten Gesteinskomplexen sind tektonisch geprägte Drucklösungsvorgänge auf Schichtflächen durch die Untersuchungen von SCHOO 1922, PFANNENSTIEL 1958 und DUNNINGTON 1967 (zit. bei TRURNIT 1967, S. 193) seit längerem bekannt. Auf Boudinage führen MULLENAX & GRAY (1984) die von ihnen beobachtete, zonar beschränkte Suturierung von Schichtflächen zurück ("stylouboudins"). Aus dem Arbeitsgebiet können ebenfalls weitere, eindeutige Beweise für tektonisch beeinflusste Drucklösungsvorgänge auf Schichtflächen erbracht werden.

V_{S1}-Stylolithenflächen

In den vom Verfasser untersuchten transversalgeschieferten Kalksteinkomplexen weist die stylolithische Suturierung schichtparalleler Fugen besondere Merkmale auf. Die Stylolithenachsen sind nicht vertikal, sondern überwiegend schräg zur Schichtung orientiert. Diese Schrägstellung der Stylolithen wird eindeutig durch die transversal zur Schichtung angeordnete Schieferung bestimmt. Die Zapfen zeichnen sich durch charakteristische, den schieferungsparallel suturierten bankinternen Lösungsflächen sehr ähnliche Formen aus (vgl. Abb. 3). So zeigen sie s₁-parallel ausgelängte ebene Seitenflächen (asymmetrische Stylolithen) und stärker differenzierte Stylolithenformen. Zusammen mit dem stufigen, entlang der s₁-Flächen absetzenden Verlauf der Stylolithensäume wird der formende Einfluß der Schieferung deutlich hervorgehoben. Bei geringer Bankmächtigkeit bestehen außerdem Übergänge zwischen den V_{S1}-Stylolithen und den bankinternen Schieferungsflächen. Die Schieferungsflächen entwickeln sich unmittelbar aus dem suturierten Schichtflächengefüge. Für V_{S1}-Stylolithenflächen gilt als wichtiges Kennzeichen zumeist die der Schieferung folgende Neigung der Stylolithenachsen (Abb. 6, Tafel 5 und 6). In den untersuchten paläozoischen Kalksteinvorkommen entstanden durch die zum Faltenbau divergente Anordnung der Schieferungsflächen, also entsprechend dem jeweiligen Winkel zwischen der Schichtung und den s₁-Flächen, unterschiedlich stark geneigte V_{S1}-Stylolithenachsen (ac-Anschnitt!). Die in Tafel 4 abgebildeten Beispiele aus thüringischen und den Wildenfelser Vorkommen zeigen auf Grund des fast banknormalen Einfallens der s₁-Flächen nur gering geneigte V_{S1}-Stylolithen. Dagegen sind sie im oberdevonischen Massenkalk des Elbingeröder Komplexes, bei stärker geneigter, NW-vergenter Lage der Schieferungsflächen, häufig flach bis spitzwinklig zur Schichtung angeordnet. Der bestimmende und ausrichtende Einfluß der Schieferung wird hierbei besonders deutlich (Abb. 6 und Tafel 5).

Die Schieferung ist neben den nur zum Teil deutlicher hervortretenden Bankungsfugen das dominierende Gefügeelement im Riffkomplex. Ist die Schichtung nahezu unkenntlich, so liefern die stylolithischen Säume der V_{S1}-Stylolithenflächen, wie im Aufschlußbild der Abb. 6 dargestellt, öfters wichtige Anhaltspunkte zum Erkennen der Schichtung. Einen Ausschnitt aus diesem Aufschluß zeigt Bild 1 in Tafel 5.

In ihrem Erscheinungsbild, durch die divergente Anordnung und die Schräglage zur Schichtung den V_{S1}-Stylolithen sehr ähnliche Formen beschrieb SWIDROWSKA (1980) aus gefalteten mesozoischen Kalksteinschichten vom SW-Rand des Heiligenkreuzgebirges (Góry Swietokrzyskie). Der dort getroffenen kinematischen Interpretation, sigma-1 in Richtung der "V-Stylolithen"-Achsen (Abb. 4, S. 161), kann für die Entstehung der V_{S1}-Stylolithen nicht gefolgt werden (vgl. Kap. 2.3.).

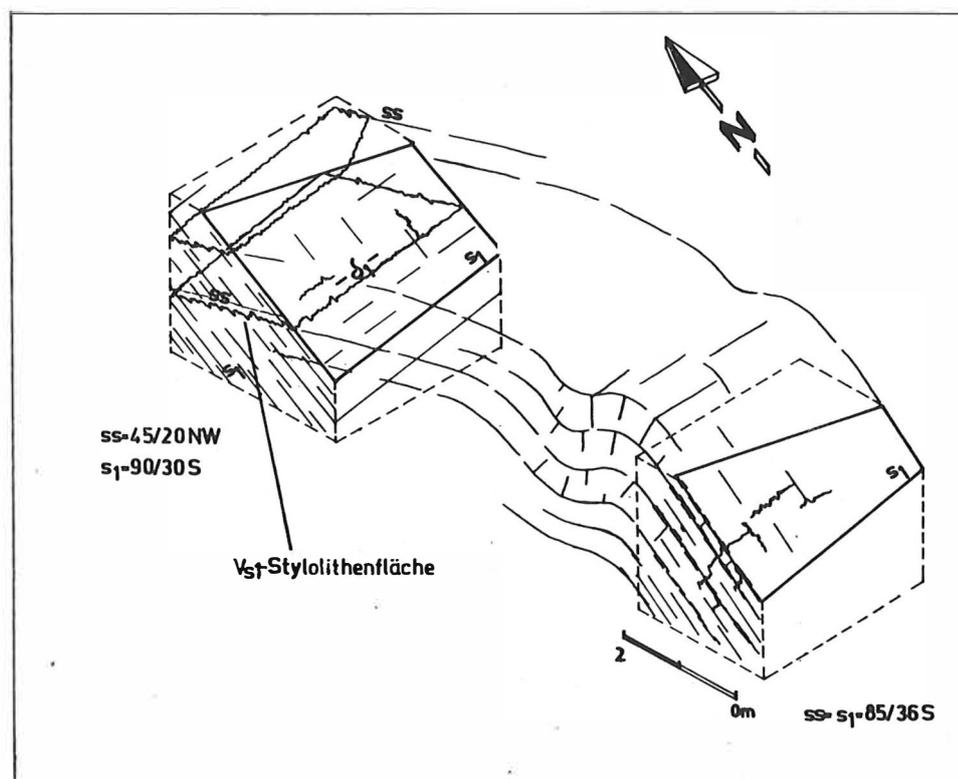


Abb. 6 Anschnitt aus einem stillgelegten Steinbruch am S-Eingang zum Schwefeltal, Ostseite. Die zur Schichtung relativ stark geneigte Lage der Schieferung hebt den bestimmenden Einfluß des s_1 -Gefüges für die stylolithische Suturierung der Schichtfugen markant hervor (V_{s_1} -Stylolithenflächen, vgl. Bild 1 in Tafel 5).

In diesem Zusammenhang sei auf das gemeinsame Auftreten schräg und vertikal stehender V-Stylolithen innerhalb einzelner, durch Schrägschichtung gekennzeichnete Schaumkalkbänke hingewiesen (Tafel 7, Bild 4). Die "schrägen" V-Stylolithen stehen rechtwinklig auf dem Schrägschichtungsblatt. Über gleiche Beobachtungen berichtete bereits FLESSMANN (1972, S. 334). Derartige Formen machen allerdings deutlich, daß einer einfachen, auf vertikal gerichteten Druck begründeten Interpretation der Vertikalstylolithen so ohne weiteres nicht zugestimmt werden kann. Im dargestellten Fall müßten dann auch die Schrägschichtungslaminen streng vertikal orientierte V-Stylolithen aufweisen, so wie sie bei den benachbarten, horizontal geschichteten Horizonten ausgebildet sind. Das für die Entstehung der V_{s_1} -Stylolithen maßgebliche Deformationsgefüge (Schieferung) trägt nicht nur im (ac-)Kluftanschnitt, sondern auch auf den Schichtfugen zur Ausbildung spezieller, und zwar zu linear orientierten Drucklösungsformen bei. Durch das Zusammenwirken von Schichtfugen und schieferungsparallelen Lösungsbahnen entstehen wannen- bis rinnenförmige bzw. keilartige Drucklösungs"-Eindrücke" auf den Schichtflächen (Tafel 4, vgl. auch Tafel 1). Die Umrisse dieser Eindrücke sind gegenüber der strengen Parallelität des Schieferungsgefüges (σ_1 -Lineation, σ_1 -parallele Stylolithenachsen) stärker abgerundet, z. T. langoval. Die Drucklösung erzeugt zwischen den Lösungsflächen vermittelnde, abgerundete Formen.

An einer zur Schieferungsdeformation synkinematischen (syngenetischen) Entstehung der V_{S1} -Stylolithen besteht auf Grund der typischen Ausbildung und den vorhandenen Übergängen zu Schieferungsflächen kein Zweifel. Mit der Herausbildung des Schieferungsgefüges vollzog sich auch die stylolithische Suturierung der Schichtfugen. Das gesamte Gefügeinventar, das tektonische und das sedimentäre Gefüge, wurde annähernd gleichzeitig und im Rahmen eines einheitlichen Deformationsprozesses von Drucklösungsvorgängen erfaßt.

Die hier dargestellten, durch die Schieferung bestimmten Drucklösungserscheinungen auf schichtparallelen Lösungsfugen sind überzeugende Beispiele für tektonisch beeinflusste Drucklösungsvorgänge auf Schichtfugen. Sie ergänzen die bereits aus postvariszischen Kalksteinen bekannt gewordenen Beobachtungen. Drucklösungsvorgänge auf Schichtfugen können, im Gegensatz zur eindeutigen Festlegung TRURNIT's (1968, S. 381), durch tektonische Deformationsprozesse (Faltung, Schieferung, Bruchbildung: Störungen, Klüfte) aktiviert bzw. ausgelöst werden.

2.3. Tektonische und lithofazielle Faktoren

Obwohl eine exakte Analytik zu diesem Problemkreis nicht vorliegt, sollen doch einige auffällige Beobachtungen zum Einfluß tektonischer und fazieller Faktoren mitgeteilt werden. Für die Ausbildung der Drucklösungsgefüge sind beide Faktoren wesentlich. Sie sind im Zusammenhang mit der Ausbildung des gesamten Deformationsgefüges wirksam.

Der Einfluß dieser Faktoren äußert sich mesoskopisch besonders in der unterschiedlichen Anzahl der Drucklösungsflächen. Die Anzahl suturierter Flächen wird einerseits durch die Art und die Intensität der Deformation bedingt. So ist teilweise die Schieferung im Scheitelbereich der Falten deutlich engständiger entwickelt als im Flankenbereich (Abb. 1 und Tafel 3). Auch die Brekzierung, z. B. entlang von Störungsflächen, kann mit dem erhöhten Flächenangebot zu einer stärkeren Suturierung des Gefüges beitragen (n. KUPETZ 1978, in WALD 1981, s. Taf. 3). Doch wirkt sich insgesamt der tektonisch bedingte Einfluß in den Vorkommen weit weniger aus als die lithofazielle Ausbildung der Karbonatkomplexe. Vergleicht man die verschiedenen Aufschlußgruppen untereinander, so fällt auf, daß in den massigen bis dickbankigen Kalksteinen (Riffkalke, massige Flaserkalke) Drucklösungserscheinungen, und damit auch Schieferungsflächen, generell seltener sind als in enger gebankten Kalken. In den deutlich gebankten Kalken vergrößert sich dagegen die Anzahl der tektonischen Suturflächen (Schieferungsflächen) und die der schichtparallelen Lösungsfugen erheblich. Mit abnehmenden Schichtflächenabstand entstehen sehr eng vergitterte Drucklösungsgefüge (Tafel 2). Schichtparallel eingelagerte brekziöse Horizonte weisen die zahlreichsten Drucklösungssäume auf.

Die große Bedeutung der primären Ausbildung, besonders die Bedeutung des Tonanteils für die Entstehung spezieller Gefügetypen der Flaserkalke, ist in den Wildenfels Aufschlüssen bereits an Hand des Geländebefundes recht gut zu beobachten. So sind schichtparallel das Gestein durchsetzende brekziöse Horizonte besonders an Zonen mit erhöhten Anteilen toniger (mergeliger) Einlagerungen gebunden. Diese brekziöseren Horizonte zeigen deutliche Übergänge zum Gefüge in den kompakteren Kalkbänken. In Abhängigkeit von der Bankmächtigkeit sind zwischen weitständig zerteilten (kompakt) und brekziösen Gefügetypen alle Übergangsformen ausgebildet (Tafel 2 und 3). So wie sich die Anzahl der Suturflächen erhöht, verstärkt sich bei geringerer Mächtigkeit der brekziöse Charakter der Einzelbänke. Die generelle Beziehung zur Lage der Schieferungsflächen bleibt dabei in der gesamten Schichtfolge durchaus bewahrt (Tafel 2 u. 3, Bild 3 und 4). Der Autor deutet diese durch Übergänge verbundenen Gefügetypen in folgender Weise: Bei geringerem Schichtflächenabstand, als Ausdruck eines höheren Anteils toniger Zwischenlagen, verstärkt sich die Anisotropie des Gesteins, wodurch wiederum das Deformationsverhalten der Schichten bestimmt bzw. verändert wird. Die Schieferungsdeformation führt unter Einbeziehung der Schichtfugen, über eine regelmäßige Zerteilung in Sigmoidkörper (geringer Tonanteil), zu einer zunehmenden und stärker bruchhaften Zerstörung des Gesteinsgefüges bei erhöhtem Tonanteil. In brekziösen Horizonten ist die Wirksamkeit der Schieferung dann an Hand der schieferungsparallelen Einregelung einzelner Kalkbruchstücke besser zu erkennen (Tafel 3, Bild 5).

Das Ausmaß der Gefügezerstörung wird hier insbesondere von der Ausbildung des primären Ausgangsgefüges bestimmt und nimmt mit steigendem Tonanteil weiter zu.

Das unterschiedliche Deformationsverhalten eng benachbarter, kompetenter und inkompetenter Lagen während der Schieferung (hoher Anisotropiegradient) wird als die eigentliche Ursache für die Ausbildung der unterschiedlichen Gefügetypen angesehen. Da auch Kalksteinkomplexe mit deutlicher V_{S_1} -Suturierung bei abnehmendem Schichtabstand verstärkt unregelmäßig zerteilte Bankfolgen aufweisen, dürfte schichtparallelen Gleitbewegungen kaum eine wesentliche Bedeutung zukommen (vgl. Tafel 4, Bild 2). Weiterhin lassen sich auch einige als frühdia-genetische Rutschungsgefüge angesprochene Erscheinungen im Sinne der oben vertretenen Auffassung besser erklären. So ist es unverständlich, warum diese "Reliktgefüge" nicht von der (dann jüngeren) Schieferung quer durchschlagen wurden. Das spezifische Deformationsverhalten inkompetenter Einlagerungen während der Schieferungsdeformation zeigte sich dem Autor u.a. im Elbingeröder Komplex, wo schieferungsparallel eingebogene Kalkmergellagen Schichtung vortäuschen können.

Die primäre lithofazielle Ausbildung der Karbonate, soweit sie sich mesoskopisch insbesondere in der Schichtung äußert, beeinflusst das Deformationsverhalten und prägt die Entwicklung unterschiedlicher Gefügebilder in den Flaserkalken. Das primäre Gefüge wirkt sich aber nicht nur in dieser Hinsicht bestimmend aus. Die Schichtung ist als potentiell drucklösungsfähiges Gefügeelement auch unmittelbar im Rahmen tektogener Deformationsprozesse wirksam. Die mit der Schieferung entstandenen Drucklösungserscheinungen auf den Schichtfugen sind dafür ein wichtiges und überzeugendes Beispiel.

Die Anzahl bankinterner tektonischer Drucklösungsflächen, hier deutlich von der primären Ausbildung der Karbonate und speziell vom Schichtabstand beeinflusst, stellt die wesentlichste Grundlage für die Ermittlung von Drucklösungsbeträgen dar. Dabei ist es im Prinzip unwichtig, auf welchem Wege diese Angaben letztlich gewonnen werden (graphisch, geochemisch). Die enge Wechselwirkung zwischen tektonischen und lithofaziellen Faktoren, und das gilt im übertragenen Sinne auch für das Tafeldeckgebirge, stehen einer Ermittlung vergleichbarer Drucklösungsbeträge entgegen (vgl. Kap. 4). Auf eine Ermittlung der Drucklösungsbeträge, z. B. entlang der Schieferungsflächen, wurde aus diesem Grund verzichtet. Ebenso konnte die überwiegende, z. T. fast vollständige schieferungsparallele Ausrichtung der Stylolithen auf diesen Flächen kein geeignetes Maß zur Ableitung quantitativer Einengungsbeträge sein.

2.4. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Die im Zusammenhang mit der Schieferung entstandenen Drucklösungsgefüge zeigen einige charakteristische Merkmale, die hinsichtlich der kleintektonischen Bewertung der Stylolithen als Indiz gerichteter Kompression über die bearbeiteten Aufschlüsse hinaus beachtenswert erscheinen. So konnte festgestellt werden, daß die Stylolithenachsen der suturierten Schieferungsflächen zum überwiegenden Teil nicht parallel, sondern rechtwinklig zur Hauptkompressionsrichtung ausgerichtet sind. In den Aufschlüssen gelang damit der eindeutige Nachweis, daß die Achsen der Stylolithen tektonischer Drucklösungsflächen nicht stets in Richtung der größten Kompression bzw. des größten Druckes weisen.

Die Stylolithenachsen der Schieferungsflächen weisen zusammen eine auf die s_1 -Hauptebene (s_1 -Symmetrieebene) beziehbare Richtungsverteilung auf, mit vorherrschend schieferungsparalleler Ausrichtung. Diese bevorzugte Ausrichtung der Stylolithen wird insbesondere auf die spezifischen, durch das Intergefüge vorgegebenen Bedingungen des Lösungstransportes zurückgeführt (gerichteter Lösungstransport). Der unmittelbare Richtungsbezug zum Hauptdeformationsvektor ist dadurch weitgehend aufgehoben. Die während der Schieferung dreiaxial wirksamen Deformationsbedingungen (BANKWITZ 1965, BREDDIN 1967 u.a.) werden aber insgesamt durch die beobachteten Drucklösungserscheinungen, suturierte Schieferungsflächen und V_{S_1} -Stylolithenflächen, deutlich unterstrichen.

Eine Bewertung der einzelnen Hauptdeformationsachsen bzw. Hauptspannungsachsen (größte, mittlere, kleinste) läßt die Stylolithenorientierung jedoch nicht zu. Sie kann nur nach dem zugehörigen flächenhaften Deformationsgefüge vorgenommen werden. Die Wirksamkeit des sedimentären Gefüges im Rahmen tektonischer Deformationsvorgänge äußert sich in zweifacher Hinsicht. So trägt die Schichtung zur Ausbildung spezifischer Drucklösungserscheinungen bei (V_{S1} -Stylolithenflächen, Flaserkalkgefüge). Sie beeinflußt aber auch die Ausrichtung der Stylolithen von tektonischen Flächen. Die schichtparallele / schichtungskonforme stylolithische Durchdringung der Sutureflächen setzt eine Flächenbildung bei söhlicher Schichtlagerung nicht voraus. Eine derartige Orientierung der Stylolithenachsen begründet somit auch nicht ausreichend und pauschal die Annahme von streng schichtparallel oder horizontal verlaufenden Stress- bzw. Spannungsachsen. Aussagen über den Zeitraum der Entstehung von Drucklösungserscheinungen, die z. B. im gefalteten Tafeldeckgebirge oft unter Hinweis auf die (schichtparallel) geneigte Achsenlage der Horizontalstylolithen erfolgen (KURZE & NECKE 1979, HOSSEINIDUST 1980 u.a.), sollten diesen Umstand in Betracht ziehen. Erst die Kenntnis der genetischen Stellung des zugehörigen Flächengefüges erlaubt eine Aussage darüber, ob das Drucklösungsgefüge prä-, syn- oder postkinematisch zur Schichtverbiegung entstanden ist.

In geschieferten Kalksteinen besteht ein direkter, genetischer Zusammenhang zwischen dem gefügeprägenden Schieferungsprozeß und der Entstehung entsprechender Drucklösungsgefüge. Die Drucklösung setzt in den Gesteinen gleichzeitig und synkinematisch zur Schieferung ein (PLESSMANN 1964, RICHTER 1965 u.a.). In den hier bearbeiteten Aufschlüssen wurde dieser Sachverhalt besonders an Hand der Ausbildung stylolithisch suturierter Drucklösungsformen dargestellt. Insgesamt ist der Schieferungsprozeß ein wichtiges, weil eindeutiges Beispiel für die Gleichzeitigkeit zwischen dem Deformationsprozeß und dem Einsetzen von Drucklösungsvorgängen.

Eine weitere Schlußfolgerung erlaubt das unterschiedliche Alter der bearbeiteten Gesteine. In allen Vorkommen wurde der größte Teil der Drucklösungserscheinungen, einschließlich der suturierten Schichtflächen, durch die Schieferung geprägt. In den devonischen, besonders in den älteren Sedimentkomplexen (Obersilurische Ockerkalke) ist aber mit einer stärkeren diagenetischen Verfestigung - Lithifikation - auch mit diagenetischen Drucklösungsvorgängen zu rechnen, noch bevor die Schieferungsdeformation wirksam war (vgl. SCHNEIDER 1977, S. 59 f). Die während der Diagenese entstandenen Drucklösungserscheinungen wurden vermutlich durch die tektogene Anisotropierung des Gesteinsgefüges fast vollständig verwischt bzw. überprägt. Drucklösungsvorgänge können demnach erneut und wiederholt eintreten und sind nicht nur während der Diagenese, sondern auch im Anschluß daran im Rahmen der Tektogenese (SCHNEIDER 1977), wirksam.

3. Tektonische Drucklösungserscheinungen in postvariszischen Karbonatgesteinen des Tafeldeckgebirges

Im folgenden werden die Drucklösungserscheinungen im Tafeldeckgebirge einer vergleichenden und kritischen Analyse unterzogen. Dazu werden die im Schiefergebirge erkannten Beziehungen, die zahlreichen Publikationen besonders über mesozoische Kalkkomplexe und eigene Untersuchungsergebnisse herangezogen. Anlaß für eine kritische Betrachtung der vorliegenden Tafeldeckgebirgsuntersuchungen war vor allem die z. T. recht willkürliche kleintektonische Bewertung stylolithischer Indikationen als Indiz größter Kompression. Damit eng verbunden stieß die paläotektonische Interpretation der Drucklösungserscheinungen, ihre kinematische und zeitliche Einordnung, wiederholt auf Widersprüche zum geologischen Gesamtbefund.

Die vom Autor im Tafeldeckgebirge durchgeführten Untersuchungen beschränkten sich nicht nur auf die Ermittlung der stylolithischen Richtungsverteilung. Soweit wie möglich wurde das für die tektonischen Drucklösungserscheinungen bestimmende Gefügeinventar (Klüfte, Suturflächen u.a.) erfaßt. Nach den dabei erzielten Ergebnissen muß eine formale kleintektonische Bewertung der H-Stylolithen als Indiz größter Kompression auch hier ausdrücklich abgelehnt werden.

3.1. Beziehungen zwischen dem rupturellen Deformationsgefüge und tektonischen Drucklösungserscheinungen

Ebenso wie im Grundgebirge sind tektonische Drucklösungserscheinungen in postvariszischen Karbonatkomplexen in der Regel unmittelbar an das tektonische Gefügeinventar, insbesondere an die Klüftung gebunden. Das Drucklösungsgefüge entspricht in seiner Anlage und Ausrichtung den vorhandenen Strukturrichtungen.

Die weitere Bearbeitung in der süddeutschen Großscholle sowie in angrenzenden mesozoischen Tafel- und Faltengebieten führte gegenüber früheren Darstellungen (WAGNER 1967, PLESSMANN 1972, WUNDERLICH 1973) zu einem zunehmend differenzierten Bild in der räumlichen Ausrichtung der Horizontalstylolithen. Abhängig vom Untersuchungsgrad spiegeln sich in den verbreitetsten stylolithischen Richtungen die Hauptrichtungen des tektonischen Flächeninventars der regionalen Einheiten wider (lokale und regionale Kluftsysteme; Hauptrichtungen mitteleuropäischer Störungssysteme, KURZE & NECKE 1979 u.a., vgl. auch JANSSEN 1985, dieses Heft).

Durch kleintektonische Untersuchungen und die Einbeziehung kluftstatistischer Angaben konnte die enge Bindung des Drucklösungsgefüges an die Klüftung immer wieder bestätigt werden (WAGNER 1964, SCHRAMM 1967, HOFFERS 1974, BUCHNER 1978, HOSSEINIDUST 1980 u.a.). Besonders deutlich tritt sie in Gebieten mit einheitlichem orthogonalen Hauptklufmuster in Erscheinung (z. B. beim regional dominierenden rheinisch-herzynen Kluftsystem, vgl. WAGNER 1964, Abb. 21a, b und ARTHAUD & CHOUKROUNE 1972, Abb. 6 und 7).

Die gleichartige orthogonale Anordnung von Kluft- und Stylolithenmaxima, z. T. mit gleichwertiger Belegungsdichte sowie analoge Streichrichtungsänderungen unterstützen die oben genannte Beziehung (vgl. die Übersichtskarten bei BUCHNER 1978 und HOSSEINIDUST 1980). Die Untersuchungen in gefalteten Deckgebirgskomplexen brachten insgesamt gleiche Ergebnisse. Die Anordnung des Drucklösungsgefüges entspricht der spezifischen, an die Faltung gebundenen Klüftung (Suturflächen in ac- und bc-Position mit flächennormal orientierten Stylolithen, vgl. PLESSMANN 1972, Abb. 5; SCHOO 1922 und PFANNENSTIEL 1958, zitiert bei TRURNIT 1967, S. 193 f). Von LANGHEINRICH & PLESSMANN (1968) stammt die Beschreibung einer mit dem Schieferungsphänomen vergleichbaren, stylolithisch suturierten s-Flächenschar. Über nachweisbar durch Störungstektonik beeinflusste Drucklösungserscheinungen (Horizontal- und Vertikalstylolithen) berichteten ARTHAUD & MATTAUER (1972). Ebenso sind die im Muschelkalk der germanischen Trias auftretenden spezifischen Strukturelemente (Querplattung u.a., s. Kap. 3.1.2.) durch gefügeorientierte Drucklösungserscheinungen gekennzeichnet.

Den vorliegenden Untersuchungsergebnissen ist zu entnehmen, daß die Anordnung und die stylolithische Orientierung der tektonischen Drucklösungserscheinungen im Tafeldeckgebirge weitgehend mit dem Bauplan des tektonischen (rupturellen) Flächengefüges übereinstimmt. Die enge genetische Bindung an das Deformationsgefüge unterstreichend, ergeben sich damit auch deutliche Parallelen zu den Verhältnissen im paläozoischen Grundgebirge.

Aus dem geometrischen wird von den meisten Autoren auch ein zeitlicher und kinematischer Zusammenhang zwischen der Kluftbildung und den Drucklösungsvorgängen hergestellt (zapfenparallele Klüfte, Klüfte als Suturflächen). Detailliertere Aussagen zur zeitlichen Stellung beider Prozesse sind allerdings recht selten. So sprach sich beispielsweise WAGNER (1964) für eine annähernd gleichzeitige Entstehung von Klüften und kluftparallelen Horizontalstylolithen aus. Er präziserte seine Aussage durch die Feststellung, daß sich die Stylolithen eher etwas später (als die Klüfte) gebildet haben (S. 544). Ähnlich äußerte sich auch SCHRAMM (1967). Für TRURNIT (1968, S. 381) setzt Drucklösung entlang tektonischer Flächen allgemein während der Heraushebung und Zerklüftung ein. In paläozoischen Kalksteinen gelten besonders die an die Schieferung gebundenen Drucklösungserscheinungen als ein wichtiges Beispiel für cogenetisch zur flächenbildenden Deformation einsetzende Drucklösungsvorgänge. Im Hinblick auf die Klüftung im Tafeldeckgebirge ergibt sich in den vom Autor untersuchten Aufschlüssen prinzipiell die gleiche Schlußfolgerung. Die in den folgenden Kapiteln ausführlicher dargestellten Untersuchungsergebnisse bereits vorwegnehmend, unterstützen die Altersbeziehungen der Suturflächen untereinander, ihre kluftgemäße Anordnung und die den Hauptgefügerichtungen folgenden Stylolithenachsen die Auffassung einer cogenetisch zur Kluftbildung einsetzenden Entwicklung tektonischer Drucklösungsgefüge. Die Anerkennung dieser genetischen Beziehungen, die bereits in klassischen Arbeiten Ausgangspunkt für eine tektonische Interpretation der Stylolithen war (z. B. RIGBY 1953), kann zur weiteren Lösung einiger Probleme beitragen. Das Bestehen einer solchen genetischen Beziehung ist allerdings erst nachzuweisen. Sie gilt keinesfalls generell. Teilbarkeiten entstehen ebenso ohne Drucklösungsvorgänge auf den Flächen. Die bruchhafte Zerteilung von "zarten" Stylolithenflächen weist darüber hinaus auf eine fortgesetzte und nachträgliche Ausgestaltung dieser Flächen hin.

3.1.1. Altersbeziehungen zwischen tektonischen Drucklösungsflächen

Auf die Problematik, eindeutige Altersbeziehungen zwischen den stylolithischen Richtungsgruppen herzustellen, wird in der Literatur vielfach hingewiesen (PARK & SCHOT 1968, SCHRAMM 1967, BEIERSDORF 1969, KURZE & NECKE 1979). Nicht nur auf Stylolithen beschränkt, ermöglicht erst ein betont flächenbezogenes Herangehen die Rekonstruktion der relativen Altersbeziehungen unterschiedlicher Gefügerichtungen (Stylolithen- und Klufttrichtungen). Das Drucklösungsgefüge ist zum entsprechenden tektonischen Flächeninventar und damit zu dessen Altersverhältnissen in Beziehung zu setzen. Es sind zwei entscheidende Voraussetzungen für ein derartiges Vorgehen gegeben:

- Suturflächen, als Teilelemente des tektonischen Gefüges, werden in ihrer Anlage bereits durch die herrschenden Kluftaltersverhältnisse bestimmt.
- Die Altersverhältnisse der Suturflächen bleiben auch bei stylolithischer Suturierung trotz der stärkeren Modifizierung der Flächenform weitgehend erhalten.

Einige typische Beispiele geben die Abbildungen 7 und 8 sowie Tafel 6 wieder. Deutlich wird darin das gegenseitige und wechselnde Absetzen der stylolithischen Flächen untereinander, aber auch zu ebenen/undifferenzierten Flächenabschnitten. Stylolithenflächen lenken in die begrenzende Flächenschar ein, sie können dann auch rechtwinklig zur vorherigen Zapfenrichtung suturiert sein (Übergangsformen). Lokal sind die Stylolithen und die Suturflächen entlang der begrenzenden, zumeist zapfenparallel verlaufenden Lösungsflächen stärker ausgelängt (keine Versetzungen!). Die Detailbilder zeigen, daß die stylolithische Suturierung durch das Zusammenwirken von Flächenpaaren geprägt wird. Die stylolithisch differenzierten und die undifferenzierten Lösungsflächen weisen die gleichen Altersbeziehungen zu benachbarten Flächen auf, wie sie bei den dargestellten Kluftsystemen im ganzen bestehen. Sie entsprechen den herrschenden Kluftaltersbeziehungen.

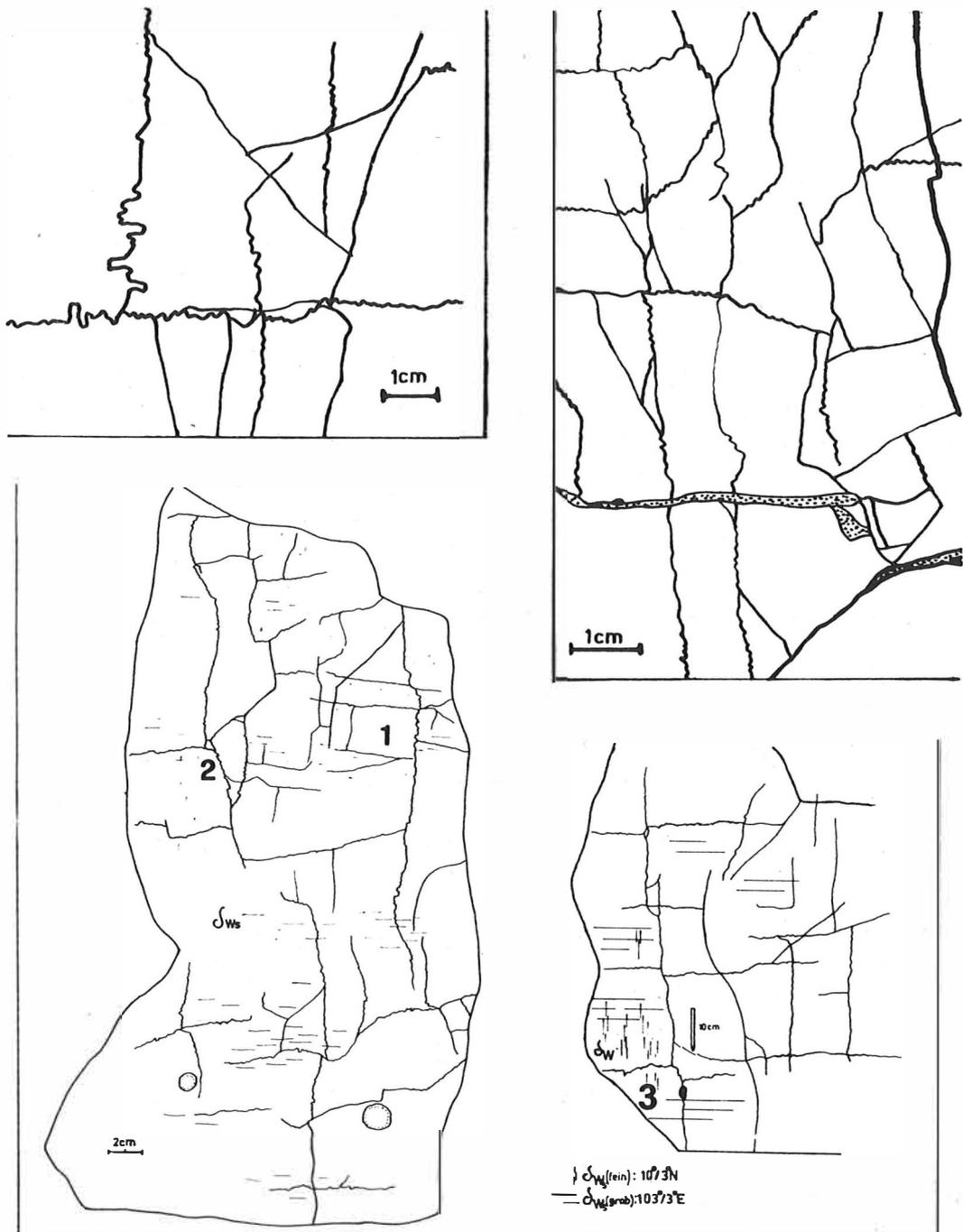


Abb. 7 Die dargestellten wechselnden Altersbeziehungen der Flächen untereinander sprechen für einzzeitig entstandene Bruchsysteme. Die allgemeine Wirksamkeit der Flächen als Drucklösungselemente und die orthogonale, den Richtungen des Hauptflächengefüges folgende Orientierung der Stylolithenachsen gelten darüber hinaus als wichtige Merkmale für cogenetisch zur Kluftbildung einsetzende Drucklösungsvorgänge. Detailfotos zu diesen Skizzen enthält Tafel 6.

Die Ermittlung der relativen Altersabfolgen von Gefügerichtungen muß deshalb bereits bei den undifferenzierten Ausgangsformen bzw. bei den zugehörigen Klufscharen selbst beginnen.

Die Beispiele bei HOFFERS (1974, Abb. 5) aus dem Randbereich des Hohenzollergrabens sind hinsichtlich ihrer Altersabfolge nach Ansicht des Verfassers gerade in umgekehrter Reihenfolge zu deuten. Die herzynischen Gefügeelemente (Klüfte, Sutureflächen) bildeten sich (etwas) früher als die rheinisch orientierten Strukturen. Eine an die Grabenzone gebundene Erscheinung, die in der grabenparallelen Hauptkluftentwicklung begründet sein dürfte.

Die allgemeine Wirksamkeit der Klufflächen als Drucklösungsbahnen ist, im Gegensatz zur Ausbildung der Wellenstreifung (Kap. 3.1.2.), gleichzeitig ein wichtiges Merkmal für cogenetisch zur Klüftung einsetzende Drucklösungsvorgänge. Die Drucklösung wirkt flächenbildend. Übergangsformen mit orthogonal ausgerichteten Stylolithen, die gegenseitige Beeinflussung der Sutureflächen sowie die festgestellten wechselnden Altersbeziehungen der Flächen untereinander gelten ebenso wie im Grundgebirge (Kap. 2.1.) als Kriterien für einzeln entstandene Drucklösungsgefüge. Dementsprechend lassen auch die orthogonal ausgerichteten Stylolithen keine zeitlich getrennte Entwicklung erkennen. Beide Richtungsgruppen entstanden annähernd gleichzeitig (s. Kap. 3.2.). Beim einfach gebauten, häufig nur orthogonal ausgebildeten Kluffmuster ist die Streichrichtungsverteilung der H-Stylolithenachsen recht einheitlich. Die Stylolithenachsen entsprechen in ihrer Ausrichtung den (orthogonalen) Hauptgefügerichtungen. Dabei muß das Kluffgefüge in beiden Hauptrichtungen nicht gleichwertig ausgebildet sein. In Gebieten mit komplizierterem Strukturbaue, so mit mehraktig entstandenen und sich gegenseitig überlagernden Bruchsystemen, können dagegen mehrere Stylolithenrichtungen auftreten. Von diesen Verhältnissen wird letztlich die gewählte Untersuchungsmethodik bestimmt (vgl. ARTHAUD & CHOUKROUNE 1972).

In Anlehnung an die im Grundgebirge praktizierte Arbeitsweise wurde in den Aufschlüssen zur Richtung der H-Stylolithen auch die Position der Sutureflächen sowie die Lage und die Ausbildung des zugehörigen rupturellen Begleitgefüges erfaßt. Erst dadurch konnten, über pauschale Richtungsbeziehungen hinausgehend, einige wesentliche Zusammenhänge zwischen den untersuchten Gefügeelementen erkannt werden. Für die in vielfältiger Weise strukturierten Vorkommen im Unteren Muschelkalk des Arbeitsgebietes gilt das im besonderen (Kap. 3.1.2.). Die Daten wurden jeweils für die einzelnen Horizonte bzw. Bänke getrennt aufgenommen, dargestellt und bewertet. So konnte detaillierter der Frage nachgegangen werden, an welche Gefügeelemente die Stylolithen gebunden sind. Dadurch war es weiterhin möglich, das Richtungsverhalten der Horizontalstylolithen eingehender zu untersuchen und einige bestimmende Einflußfaktoren aufzuzeigen. Die im Muschelkalk erzielten Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit einer solchen Arbeitsweise, da die Richtungsvielfalt der angetroffenen Gefügeelemente eine kleintektonische Bewertung und Interpretation der H-Stylolithen im Sinne der Paläospannungsanalyse erheblich erschwert.

3.1.2. Ergebnisse im Unteren Muschelkalk

Der Untere Muschelkalk zeichnet sich durch einige spezifische Gefügemerkmale aus, die für die Ausbildung der Drucklösungserscheinungen von außerordentlicher Bedeutung sind. An erster Stelle zu nennen ist die von SCHAD (1933) als Wellenstreifung, von SCHMITT (1935) als Primärklüftung bezeichnete Rupturenschar. Synonyme Bezeichnungen sind unter anderem Längsrippung (WAGNER 1967, BEIERSDORF 1969) und Querrippung (KRUCK 1974). Diese Rupturenschar durchsetzt z. T. im Millimeterabstand kompaktere Bänke der Wellenkalkfolgen; sie tritt aber auch in Zwischenlagen der Werksteinbänke des Unteren Muschelkalkes und in den hangenden Schichtgliedern auf (Mittlerer Muschelkalk). Als ältestes (tektonisches) Flächenelement ist die Wellenstreifung primär nicht mit Drucklösungsvorgängen verbunden. Nach übereinstimmenden Beobachtungen (JANSSEN 1983) ist sie auch älter als die Drucklösung auf schichtparallelen Lösungsfugen.

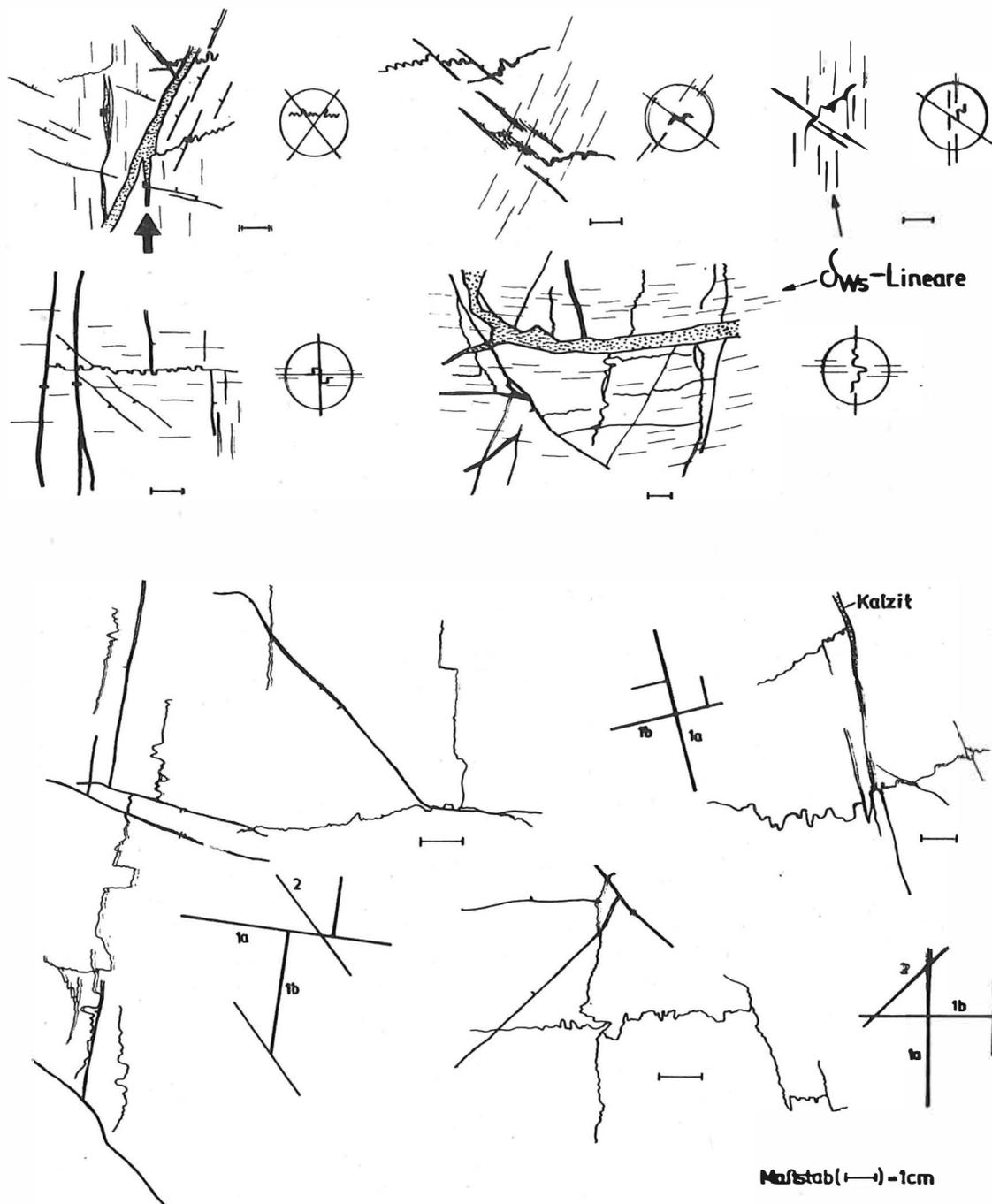


Abb. 8 Detailskizzen zur Ausbildung und zu den relativen Altersbeziehungen tektonischer Stylolithenflächen. Die oberen Skizzen verweisen auf die engen Beziehungen zur präexistente Wellenstreifung (σ_{ws} : Schnittlineare der Primärklüftung SCHMITTs mit der Schichtoberfläche). Setzen die Drucklösungsvorgänge insgesamt cogenetisch mit der Flächenbildung ein, wirken sie also selbst flächenbildend, muß eine Bewertung der Altersbeziehungen zwischen den Suturflächen bereits bei der undifferenzierten Ausgangsform beginnen.

Eine lokale Reaktivierung und Ausgestaltung dieses Flächeninventars durch jüngere Vorgänge ist indessen weitverbreitet. Es entstanden jüngere flächenparallele Drucklösungsformen (Ö_{WB} parallele H-Stylolithen, zur Primärklüftung subparallel angeordnete Sutureflächen; Abb. 8, siehe auch Tafel 6). Obwohl auch davon unbeeinflusste Sutureflächen und H-Stylolithen vorhanden sind, wirkte sich die Wellenstreifung als präexistentes Flächenelement in einem bisher kaum beachteten Ausmaß vorzeichnend und ausrichtend auf das Drucklösungsgefüge aus. Auf die Wirksamkeit präexistenter Gefügeelemente im Rahmen jüngerer Drucklösungsvorgänge wurde bereits im Schiefergebirgstail hingewiesen (Schichtung, Haarrisse). Die Wellenstreifung bzw. die Primärklüftung SCHMITTs ist ein weiteres, wichtiges Beispiel dafür, daß Drucklösungsvorgänge nicht nur einzzeitig zur Entstehung von Rupturen einsetzen, sondern sich auch entlang präexistenter Flächenassoziationen vollziehen können (GEISER & SANSONE 1981, S. 281).

In ihrem Erscheinungsbild unterscheiden sich die Wellenstreifen deutlich von jüngeren Rupturen, auch wenn diese, wie die Querplattung und die Klüfte, aus ihnen hervorgehen können. Kennzeichnend sind eine feine Kalzitanreicherung, der allgemein fehlende Tonbesteg auf den Flächen sowie ihre geringe Teilbarkeit (vgl. z. B. BEIERSDORF 1969, S. 236). Es dürfte in der besonderen Ausbildung dieser Flächen liegen, auf den Flächen vermutlich Sammelkristallisation, aber keinesfalls Zementation ehemals klaffender Fugen (KURZE 1981a, S. 489), daß cogenetisch zur Flächenbildung keine Drucklösungsvorgänge eintraten (Drucklösungsvorgänge im bisher gebrauchten Sinne: Materialverlust und Residualbelag).

In den Muschelkalkaufschlüssen wurde also gezielt der Frage nachgegangen, an welche Strukturelemente die Horizontalstylolithen gebunden sind. Dabei treten in allen untersuchten Aufschlüssen, und zwar unabhängig von deren regionaler und lokaler Position (z. B. innerhalb oder außerhalb von Störungszonen), deutliche Beziehungen zur Wellenstreifung und zur Querplattung hervor (Abb. 9 und 10). Über gleiche Beobachtungen berichteten bereits WAGNER (1967) und BEIERSDORF (1969). Darüber hinaus belegen die im Arbeitsgebiet gewonnenen Ergebnisse, daß diesen Strukturelementen eine dominierende Rolle für die Entwicklung stylolithisch suturierter Bruchgruppen und insgesamt für die rupturale Ausgestaltung im Unteren Muschelkalk zukommt. Die Querplattung bzw. die Querplattungsklüfte, einschließlich sigmoidal verbogener Flächen (Sigmoidalklüfte), können unmittelbar durch stylolithische Drucklösungserscheinungen gekennzeichnet sein. Der Querplattung sowie steilstehenden querplattungsartigen Kluftscharen folgen Horizontalstylolithen; die Querplattung ist aber auch selbst stylolithisch suturiert (Tafel 7, s. auch WAGNER 1967).

Der Begriff Querplattung bzw. Querplattungsklüfte wird hier für alle Formen plattig ablösender Bruchgruppen einschließlich der sogenannten Sigmoidalklüfte gebraucht (vgl. SCHWARZ 1975, Kap. 5.1.). Für derartige Flächenscharen ist das gemeinsame Auftreten mit der älteren Wellenstreifung oft charakteristisch, doch reicht das zur Kennzeichnung dieser vielfältigen Strukturformen allein nicht aus. Für die Aufgabenstellung war es jedoch vorerst unerheblich, daß verschiedene genetische Typen unter diesem Begriff zusammengefaßt wurden. Entscheidend war hier lediglich, daß ein großer Teil dieser Gefügeelemente bereits fröhdlagenetisch gebildet wurde.

An die Querplattung gebundene Gefügebilder zeichnen sich auf den Schichtoberflächen durch zwei Grundformen aus, die die Richtungsverteilung der H-Stylolithen bestimmen. Ist die Querplattung nur als einscharige Flächengruppe ausgebildet, so zeigen die stylolithischen Anteile fast durchweg rechtwinklig zur Flächenschar ausgerichtete Stylolithen (Tafel 7, Bild 1). Durch Übergänge miteinander verbunden, ist für die zweite Grundform die Ausbildung eines Bruchgitters mit querplattungsparalleler Hauptschar und einer untergeordneten Nebenschar kennzeichnend. Nach den wechselnden Altersbeziehungen der Flächen untereinander entstand auch die schräg bis quer verlaufende Nebenschar annähernd gleichzeitig und gemeinsam mit der Hauptschar (Tafel 7, Bild 2). Da diese Nebenschar vielfach stärker stylolithisch ausgebildet ist als die Hauptschar, trägt sie auch den größten Teil der Stylolithen. Die H-Stylolithen sind

hierbei zwar insgesamt orthogonal, aber überwiegend parallel zur Hauptflächenschar ausgerichtet.

Faßt man beide Erscheinungsformen zusammen, so wäre eine kinematische Interpretation der Querplattungsklüfte etwa im Sinne von WAGNER (1967), also unter Hinweis auf die bevorzugte Ausrichtung der Stylolithen, widersprüchlich. Sie wird weiter durch den Einfluß der Wellenstreifung auf die Ausbildung der Querplattungsklüftung erschwert, da sich die Hauptrichtung der Wellenstreifung richtungsgebend auf die Lage der Hauptklüftung auswirkt. Sie kann sich mit der Richtung der Wellenstreifung verändern (Tafel 7, Bilder 5 und 6). Eine kinematische Interpretation der Querplattung muß deshalb durch andere Merkmale sowie durch Beziehungen zu genetisch verbundenen Gefügeelementen weiter unterstützt werden (u.a. KRUCK 1974, SCHWARZ 1975). Die in Tafel 8 abgebildeten Beispiele aus thüringischen Muschelkalkvorkommen deuten für sigmoidal geformte Flächen, entsprechend der vorherrschenden Auffassung, auf den Einfluß vertikaler und quergerichteter Kräfte in einem frühen Stadium der Diagenese hin. Die Diskussion über die möglichen Ursachen der tangential angreifenden Kräfte ist dabei derzeit noch in vollem Gange (KURZE 1981a).

Es wurde bereits zum Ausdruck gebracht, daß eine enge Anlehnung suturierter Bruchgruppen an die Wellenstreifung in allen Aufschlüssen und in größerem Umfang nachgewiesen werden konnte. Die Ausbildung der subparallel verlaufenden Bruchscharen reicht von engscharigen Querplattungsklüften - sie weisen damit auf die bereits vielfach beschriebenen Richtungskonvergenzen zu diesem Gefüge hin -, bis zu weitständiger entwickelten orthogonalen Kluftsystemen (Tafel 6). Die suturierten Kluftflächen und die Horizontalstylolithen folgen z. T. unmittelbar dem Verlauf der Wellenstreifung. Besonders hervorzuheben ist hierbei, daß sich bei von Bank zu Bank wechselndem Streichen der Wellenstreifung in gleicher Weise auch die Anordnung des zugehörigen Bruchgitters und die Ausrichtung der H-Stylolithen verändert (Pfeildarstellung in Abb. 9 und 10). Die enge Bindung jüngerer Rupturen an dieses strukturelle Grundinventar kommt dadurch überzeugend zum Ausdruck. Auch im benachbarten, sich westlich anschließenden Muschelkalkgebiet lassen sich aus den Übersichtskarten von BEIERSDORF (1969, vgl. darin Abb. 14 bis 17) ebenfalls deutlichere Richtungsbeziehungen zwischen der Wellenstreifung (Längsrippung) und den Stylolithenachsen ableiten. Sie liegen auch dort oft längs und quer dazu. Die enge Bindung des Drucklösungsgefüges an die Wellenstreifung gilt in gleicher Hinsicht, wie sie der Wellenstreifung allgemein für die Ausgestaltung des Kluftmusters im Unteren Muschelkalk zukommt (vgl. VOßNER-BÄUMER 1973 und HEISE 1966). Sie gilt für beide Gefügeelemente selbstverständlich nicht ausschließlich. Die genannten Beziehungen zur Wellenstreifung sind allerdings auffallend häufig, in einigen Aufschlüssen sogar eindeutig dominierend (Tafel 7, Bild 5 und 6 sowie Abb. 9, 10). In Schichtbänken in denen die Wellenstreifung bzw. die Querplattung als solche nicht unmittelbar ausgebildet sind, zeigen die durch Drucklösungserscheinungen gekennzeichneten Kluftsysteme teilweise ebenfalls recht klare geometrische Beziehungen zu den im Gesamtaufschluß vorhandenen Wellenstreifenscharen, aber auch zu weiteren frühzeitig angelegten Strukturelementen.

Im Unteren Muschelkalk, speziell im Wellenkalk, beherrscht die frühe (frühdiaogenetische), starke Strukturierung des Gesteins wesentlich das vorhandene Gefügebild. Zu den bereits genannten Strukturformen (Wellenstreifung, Querplattung) gehören hierzu eine Reihe weiterer Gefügeelemente. Zu nennen wären schichtinterne Kleinverbiegungen bzw. Kleinfalten mit unterschiedlich starker Vergenz bis hin zu liegenden Falten. Sie lassen sowohl geometrische als auch genetische Beziehungen zur Querplattung erkennen (Tafel 8, Bild 3). Die Kleinfalten sind jünger als die Wellenstreifung und zeigen teils plastische, teils bruchhafte Verformungsbilder. Die dabei entstandenen Rupturen wurden bereits cogenetisch durch Drucklösungserscheinungen gekennzeichnet (Tafel 8). Sie belegen erneut, daß Drucklösungsvorgänge sehr frühzeitig, und zwar mit der frühdiaogenetischen Entstehung von Rupturen einsetzen können (Kap. 4).

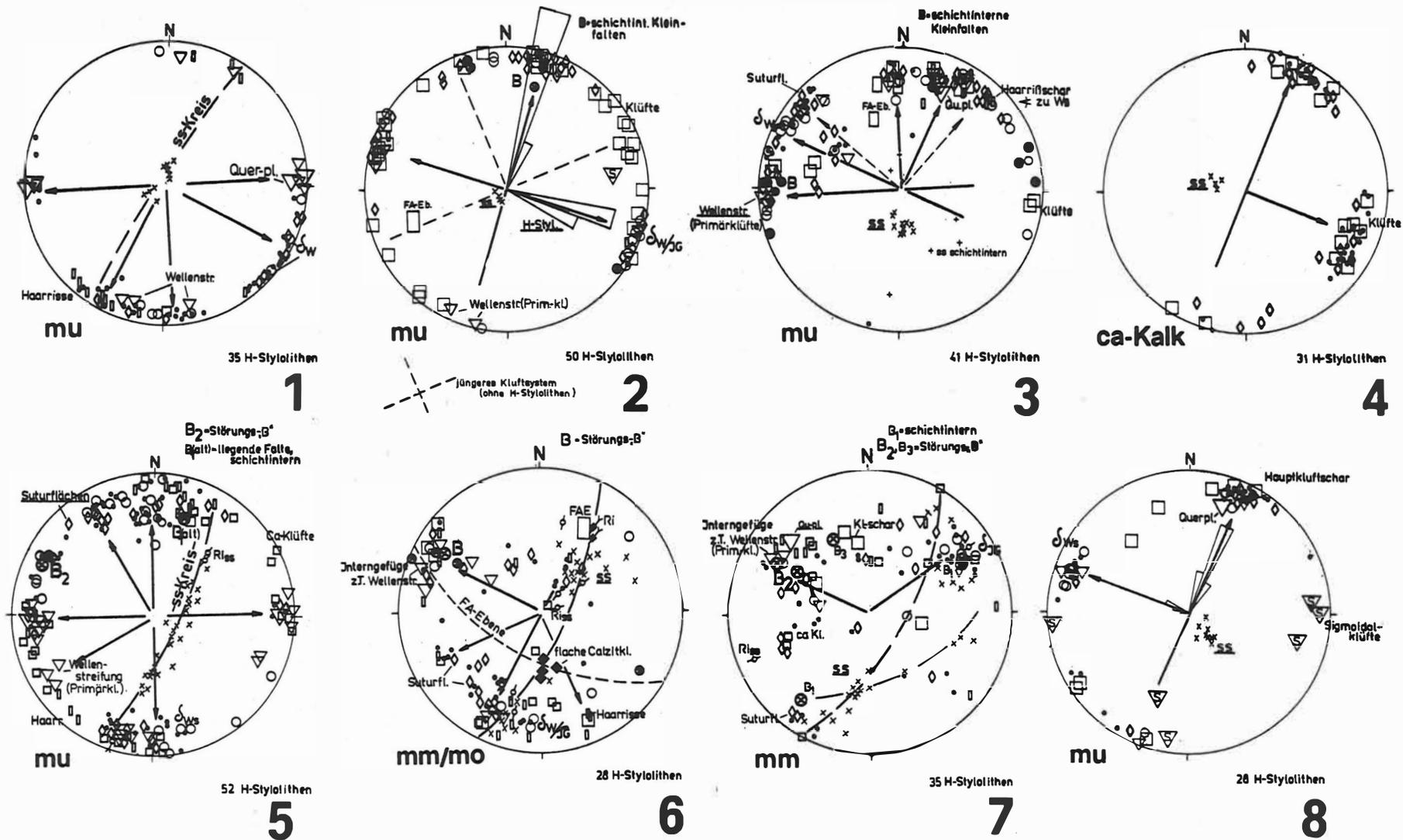


Abb. 9 Gefügediagramme ausgewählter Aufschlüsse in unterschiedlicher geologischer Position. Diagr. 1 bis 4 außerhalb von Störungszonen. Diagr. 1: Jonasthal bei Arnstadt, Diagr. 2: Euchenau bei Creuzburg/Werratal, Diagr. 3: Steinbruch nördlich Bahnhof Wutha - Muschelkalk; Diagr. 4: Mühlenberg bei Hornburg - Zechstein. Diagr. 5 bis 8 innerhalb von Störungszonen. Diagr. 5: östl. Griesheim, Diagr. 6: Schottergrube Haarhausen, Diagr. 7: Kalkberg bei Arnstadt - Eichenberg-Gotha-Saalfelder Störungszone; Diagr. 8: Steinbrüche nördlich Breitenbach/Ohmgebirgsgraben. Punkte = H-Stylolithen, weitere Legende siehe Einzeldiagramme.

DOI: <https://doi.org/10.2312/zipe.1985.083>
 Im Muschelkalk ist die enge geometrische Bindung der Klüftung und der Drucklösungsgefüge insbesondere zur jeweiligen Position der Wellenstreifung, an Hand der entsprechenden Richtungsbeziehungen zu erkennen. Innerhalb und außerhalb der Störungszonen tritt die Richtungsvielfalt der H-Stylolithen und der genetisch verbundenen Klüftesysteme (Pfeilbeziehungen) gleichermaßen in Erscheinung.

An dieser Stelle sei auch auf eine mesoskopisch kaum wahrnehmbare feine Strukturierung hingewiesen (Kornregelung?, Interngefüge - IG in Abb. 9). Sie zeigt deutliche Richtungsbeziehungen zur Wellenstreifung. Eine engständige Anisotropisierung des Gesteins könnte, wie an der Wirksamkeit des Schieferungsgefüges gut erkennbar, die Ausrichtung der Stylolithen stärker vorzeichnen, dann allerdings auch ohne eine in gleicher Richtung einwirkende Kompression (jüngere postgenetische Drucklösung). Eine Formbeeinflussung und Auslängung entlang feiner Rupturen konnte im Detail auch bei den Stylolithen der untersuchten Muschelkalkvorkommen festgestellt werden (Abb. 8). Mikroskopische Untersuchungen dürften in dieser Beziehung, wie auch in bezug auf die Wellenstreifung (vgl. BEIERSDORF 1969, S. 229), weitere Ergebnisse liefern. Im Hinblick auf petrophysikalische Untersuchungen (vgl. JANSSEN 1983, 1985) würden sich daraus für die zeitliche Einordnung und paläotektonische Interpretation der Geschwindigkeitsanisotropien ebenfalls einige Probleme ergeben, wie sie auch für H-Stylolithen noch bestehen. Weiterhin weisen die Schichtoberflächen verschiedene lineare und nichtlineare Strukturformen auf (Verbiegungsachsen, Längsachsen kompakterer und olistolithischer Einlagerungen, Wellenmarken, Sedimentwulste u.a.). Die große Vielfalt der von SCHWARZ (1975) ausführlich beschriebenen Sedimentstrukturen findet sich auch in den vom Autor bearbeiteten Aufschlüssen.

Die Untersuchungen wurden vorerst nur punktuell, dabei allerdings auf verschiedene Einheiten verteilt durchgeführt (Süd- und Nordthüringen, Nordharzrand; insgesamt 15 Aufschlüsse). Trotzdem stimmen die in den Meßpunkten gewonnenen Ergebnisse bezogen auf die Ausbildung des Drucklösungsgefüges grundsätzlich überein. Die in allen Vorkommen festgestellte Wirksamkeit unterschiedlich orientierter und häufig durch die Wellenstreifung und Querplattung geprägter Strukturgitter für die Ausbildung rupturrell gebundener Drucklösungserscheinungen liefert eine wichtige Erklärung für die große Richtungsvielfalt der H-Stylolithen, wie sie insbesondere in den Muschelkalkarealen der DDR nachgewiesen wurde (FRANZKE & JANSSEN 1984). Die Entstehung dieser Bruchgruppen, wenn sie nicht bereits unmittelbar der Querplattung in all ihren Ausbildungsformen zugeordnet werden können, dürfte ebenfalls vorwiegend in die Zeit epirogener Bewegungsetappen fallen. Das ist aus ihrem verbreiteten Auftreten zu schließen und entspricht prinzipiell den übereinstimmenden Angaben zum Drucklösungsgefüge und zur Klüftung in Bereichen saxonischer Störungszonen (vgl. SCHRÖDER 1976, KURZE & NECKE 1979, HOSSEINIDUST 1980, JANSSEN 1985 in diesem Heft). Ein weiterer Hinweis ergibt sich aus den allgemein bestehenden Richtungsbeziehungen der H-Stylolithen und der Wellenstreifung zum Verlauf tieferreichender, den Sedimentationsraum bestimmender Bruchzonen (KURZE & NECKE 1979, KURZE 1981a). Allerdings kann eine spätere bruchhafte Ausgestaltung vorhandener Wellenstreifenscharen, so durch die starke Schichtverbiegung im Bereich saxonischer Störungszonen (z. T. inverse Lagerung der Schichtkomplexe), generell nicht ausgeschlossen werden. Ein Nachweis wäre allerdings aus verschiedenen Gründen schwierig (vgl. Seite 95). Der wesentliche Einfluß des fröhdiagenetisch entstandenen Strukturmusters für die spätere rupturale Ausgestaltung und Herausbildung tektonischer Drucklösungsgefüge sollte in den Muschelkalkvorkommen allein aus den Richtungsbeziehungen heraus nicht im Sinne lang anhaltender und gleichbleibender Beanspruchungspläne gesehen werden (vgl. WAGNER 1967). Der Autor versteht diesen Einfluß eher als Ausdruck eines lokal und zeitlich veränderlichen Durchpausens und Aktivierens dieser alten Gefügeanteile. Auch innerhalb von Störungszonen ist aus der Richtungsverwandtschaft der H-Stylolithen im Muschelkalk nicht auf einen gleichbleibenden, sich zunehmend verstärkenden Stressplan zu schließen, wie ihn FRANZKE & JANSSEN (1984, Abb. 12) durch ihre Gefügediagramme zum Ausdruck brachten.

Die vom Autor z. T. in den selben Aufschlüssen (FRANZKE & JANSSEN 1984, Abb. 12) durchgeführten Untersuchungen bestätigen, daß auch innerhalb der Störungszonen die Sutureflächen und die H-Stylolithen häufig unmittelbar mit subparallelen Wellenstreifenscharen oder mit der Querplattungsklüftung korrelativ verbunden sind (Abb. 9, Diagr. 5 bis 8, Abb. 10). Das gilt gleichermaßen für die quer und längs zu den herzynischen (NW/SE) Deformationsachsen der Störungen angeordneten, wie für die schräg dazu ausgerichteten Drucklösungsgefüge. Auffallend ist auch hier wieder die vorhandene Richtungsvielfalt der Stylolithen. Die vielfältige Orientierung der H-Stylolithen steht der Annahme einfach gebauter Beanspruchungspläne entgegen. Da außerdem in "ungestörten" Aufschlüssen die gleichen Richtungen und die gleichen Merkmale auftreten (Richtungsvielfalt, bevorzugte Bindung an das fröhdiagenetische Altgefüge), kann aus

dem geometrischen nicht ohne weiteres auf einen genetischen Zusammenhang zur Störungstektonik geschlossen werden. Die Ausbildung der Drucklösungsgefüge zeigt insgesamt keine Beziehungen zur Kinematik der Störungen. Der Nachweis einer solchen Beziehung würde eine genetisch begründete Verbindung zu synkinematisch entstandenen Gefügeelementen erfordern, was in den Aufschlüssen jedoch nicht gelang (vgl. Kap. 3.2.2.).

Die in den Muschelkalkaufschlüssen erzielten Ergebnisse weisen auf einige Schwierigkeiten hin, die sich für die Interpretation der Horizontalstylolithen im Arbeitsgebiet ergeben (vgl. JANSSEN 1985, Kap. 4 und 5.3.3.). Sie sollten aber auch in den angrenzenden Muschelkalkarealen nicht unberücksichtigt bleiben. Die enge Bindung der Drucklösungserscheinungen an das bevorzugt vom strukturellen Altinventar kontrollierte Kluftgefüge, die Richtungsvielfalt sich im Aufschluß überlagernder und die Stylolithenrichtung prägender Strukturgitter, erschweren eine integrierende, regionale und darüber hinausgehende paläotektonische Interpretation der H-Stylolithen (vgl. Kap. 3.2.2.). Sie würde mit der Klärung der relativen Altersbeziehungen auch eine Analyse der zeitlichen und genetischen Stellung der Gefügeelemente im Verlauf der strukturellen Entwicklung der Tafelgebiete erfordern. Dem im Zusammenhang mit Drucklösungserscheinungen im Muschelkalk des Arbeitsgebietes bisher erreichten Untersuchungsstand mangelt es jedoch auch weiterhin an einer solchen umfassenden Analyse. Eine Bewertung und Interpretation der H-Stylolithenrichtungen betrifft damit auch unmittelbar Fragen zur Kluftgenese und den daraus ableitbaren Spannungsindikationen.

3.2. Bemerkungen zur Interpretation der Horizontalstylolithen

3.2.1. Kluftgebundene Orthogonalsysteme

Die Ausführungen der folgenden Kapitel sind im allgemeineren, also nicht nur für das Tafeldeckgebirge geltenden Sinne zu werten. Eine gewisse Skepsis gegenüber bestimmten, in diesen Gesteinskomplexen herrschenden Auffassungen, rührte ja bereits von den im Grundgebirge beobachteten Verhältnissen her. Die hier getroffene Einordnung erfolgte gemäß der aktuellen Bedeutung, die Drucklösungserscheinungen gerade im Tafeldeckgebirge besitzen.

Der Ableitung von Spannungsplänen, unter besonderer Berücksichtigung der Horizontalstylolithen und als Beitrag zur Paläospannungsanalyse verstanden, wurde in den vergangenen Jahrzehnten große Aufmerksamkeit geschenkt. Grundlage der Bearbeitung in mitteleuropäischen Tafelgebieten waren vor allem die Arbeiten von WAGNER (1964, 1967). Seine kleintektonischen Untersuchungen im Gebiet des "Nördlinger Ries" und angrenzender Tafelbereiche führten zu dem Ergebnis, daß die Achsen der Horizontalstylolithen parallel zur Richtung der größten und horizontal wirkenden Druckspannungsachse orientiert sind (1964, S. 545). Durch die nachfolgenden Arbeiten wurde jedoch nicht nur eine differenziertere Orientierung der Horizontalstylolithen im Mitteleuropäischen Schollenfeld festgestellt. Auch die Interpretation der verschiedenen stylolithischen Richtungsgruppen und ihre Zuordnung zu bestimmten (groß-)regionalen Deformationsstadien im Sinne von WAGNER blieb nicht frei von Widersprüchen und zwang zu verschiedenen Deutungen (SCHRAMM 1967, Kap. V; HOFFERS 1974, S. 69 f; KURZE & NECKE 1979, S. 637). Im folgenden wird deshalb versucht, unter Betonung der dargestellten Zusammenhänge zwischen dem Kluft- und dem Drucklösungsgefüge, einige Gesichtspunkte für die (klein-)tektonische Bewertung der Drucklösungsindikationen besonders hinsichtlich ihrer Verwendung zur Spannungsanalyse, aufzuzeigen. Durch die Ergebnisse in den Grundgebirgskalken angeregt, stellt sich auch hier die Frage, ob Horizontalstylolithen stets in Richtung des größten Druckes ausgerichtet sind. Die aufgezeigten Altersbeziehungen (Kap. 3.1.1.) sprechen bereits gegen eine solche Deutung. Bestehen geometrisch-genetische Beziehungen zum Kluftinventar, so läßt sich die Anlage und Formung des tektonischen Drucklösungsgefüges, als Teilelement des Kluftgefüges, auf den

während der Kluftbildung herrschenden Spannungsplan übertragen. Für die häufig orthogonal orientierten Kluft- und Drucklösungsgefüge gewinnen damit neuere Angaben zur Kluftentstehung und zur Spannungsanalyse aus Klüften (u.a. BANKWITZ 1978, 1980; BANKWITZ & BANKWITZ 1982; BOCK 1972, 1980) auch für die Bewertung entsprechender Drucklösungsphänomene eine entscheidende Bedeutung.

Für die hier behandelte Fragestellung ist folgendes bedeutsam. Genetisch zusammengehörige Haupt- und Nebenkluftscharen (BANKWITZ 1978, S. 307) entstehen im Gefolge eines einheitlichen Spannungsplanes. Sie bilden sich ungefähr gleichzeitig und unter dreiaxialer, aber in den Hauptspannungsrichtungen mit unterschiedlicher Stärke wirkender Einspannung (BOCK 1980, Abb. 13). Setzte die Drucklösung mit der Kluftbildung ein, so entstand das zugehörige Drucklösungsgefüge, einschließlich der häufig orthogonal ausgerichteten Stylolithengruppen, ebenfalls gleichzeitig und unter gleichem Hauptspannungsplan. Das Drucklösungsgefüge ist dem Kluftgefüge adäquat ausgebildet (Anordnung der Suturflächen: Suturflächen im engeren Sinne, Schrägstylolithen, Nadelharnische, nach den Bezeichnungen von WAGNER 1964, S. 533; vgl. hierzu Tafel 6). Die Entstehung einfach gebauter Drucklösungsgefüge mit bevorzugt in eine (Haupt-)Klufttrichtung orientierten H-Stylolithen setzt selbstverständlich die Bildung einer zweiten, quer dazu angeordneten Flächenschar voraus. Sie ist der Träger der Stylolithen (Suturflächen; vgl. WAGNER 1964, Abb. 21a und ARTHAUD & MATTAUER 1969, Abb. 1). Beide Strukturkomponenten eines (orthogonalen) Kluftsystems sind für die Entwicklung derartiger Drucklösungsgefüge erforderlich. Dadurch und durch die orthogonale, auf die Hauptstrukturrichtungen bezogene Ausrichtung der H-Stylolithen in cogenetisch entstandenen Gefügesystemen, werden aber gleichzeitig - auf die Horizontalebene projiziert -, die zweiaxialen Kompressionsbedingungen unterstrichen, wie sie allgemein für die Entstehung von Klüften bzw. Kluftsystemen kennzeichnend sind.

Nach den bisherigen Untersuchungen ergeben sich aus den hier betrachteten Gefügeelementen (Klüfte, H-Stylolithen) für die Lage und die Bewertung der Horizontalkomponenten von Spannungsvektoren, und darauf wird man sich oft beschränken müssen (s. unten), folgende Anhaltspunkte: Die Lage der Spannungsachsen ist annähernd durch das Streichen der vorherrschenden Klufttrichtungen (z. T. vollständig als Suturflächen ausgebildet) und durch die Haupttrichtungen der zugehörigen Horizontalstylolithen festgelegt. Dabei entsprechen die der Hauptklufttrichtung folgenden Stylolithenachsen dem Verlauf der größeren horizontalen Hauptnormalspannungsachse. Rechtwinklig dazu, also in Richtung des zweiten Stylolithenmaximas, liegt die Achse der kleineren horizontalen Hauptnormalspannung. Eine Bewertung und Zuordnung der Stylolithenrichtungen in cogenetisch suturierten Kluftsystemen ist demnach nur an Hand der Ausbildung des Kluftsystems möglich (Hauptkluftschär, Nebenklüfte, Diagonalklüfte u.a.).

Diese hinsichtlich der Diskussion allgemeiner Kompressionsbedingungen für die Entstehung der H-Stylolithen nicht neuen Überlegungen (vgl. SCHRAMM 1967, HOFFERS 1974, ARTHAUD & CHOUKROUNE 1972) sollen jedoch grundsätzlich eines verdeutlichen - Horizontalstylolithen als Indikationen tangentialer Kompression sind nicht notwendigerweise stets parallel zur stärksten Kompression bzw. zur Hauptdruckrichtung ausgerichtet. Diese Feststellung, auf einem zeitlich-genetischen Zusammenhang zwischen dem Kluft- und der Ausbildung des Drucklösungsgefüges basierend, gewinnt durch die im Grundgebirge erreichten Ergebnisse zusätzlich und in genereller Hinsicht an Aussagekraft (vgl. Kap. 2.4.).

Eine Bewertung und Zuordnung der Horizontalstylolithen zu den einzelnen Spannungsachsen (Horizontalkomponenten) sollte auch im Tafeldeckgebirge nur unter Einbeziehung weiterer genetisch verbundener Gefügeelemente und unter Berücksichtigung der Ausbildung dieser Gefügeelemente erfolgen. Obwohl gerade dieser Weg in zahlreichen klassischen Arbeiten beschritten wurde (RIGBY 1953, WAGNER 1964, ARTHAUD & CHOUKROUNE 1972), kann daraus jedoch der verallgemeinerte Schluß, tektonische Stylolithen sind nur Ausdruck und Indiz der Hauptkompressionsrichtung, nicht abgeleitet werden.

Dieser Nachweis ist in den jeweiligen Fällen erst an Hand des zugehörigen rupturellen Begleitgefüges zu erbringen. Die Interpretation der H-Stylolithenrichtungen im Sinne der Paläospannungsanalyse erfordert darüber hinaus eine genaue Entschlüsselung der zeitlichen und genetischen Stellung im Rahmen der gesamten Strukturentwicklung und setzt die Kenntnis der sie hervorrufenden Prozesse voraus. Für die Interpretation der Stylolithen im Störungsbereich ergeben sich daraus besondere Probleme, da ein direkter Nachweis genetischer Beziehungen zur Störungstektonik oftmals nicht erbracht wurde (s. Kap. 3.2.2.).

Abschließend sei nochmals ausdrücklich auf den ausrichtenden Einfluß des sedimentären Gefüges hingewiesen. Aus variszisch deformierten, aber auch aus mesozoischen Kalksteinkomplexen wurden bereits entsprechende Beispiele diskutiert (Kap. 2.1.). Sie verdeutlichen, daß das sedimentäre Gefüge die Lage der Stylolithenachsen vorzeichnen und beeinflussen kann. Bei sählig gelagerten Schichtkomplexen zeigt sich diese Einflußnahme insbesondere in Bänken mit Schrägschichtung (Tafel 7, Bild 4). Bei Horizontalschichtung kann demnach aus der horizontalen bzw. der schichtparallelen (schichtungskonformen) Lage der H-Stylolithen nicht zwangsläufig eine streng horizontal liegende Hauptnormalspannungsachse abgeleitet werden. Für den Autor lag darin ein wichtiger Grund für die oben getroffene Beschränkung und Betrachtung der Horizontalkomponenten der Spannungsachsen (Horizontalprojektion räumlich orientierter Hauptspannungsachsen).

3.2.2. Drucklösungserscheinungen in Störungsbereichen (Störungskinematik)

Stylolithen bzw. stylolithische Richtungsgruppen wurden wiederholt zur Kennzeichnung der Störungskinematik herangezogen. Obgleich sie teilweise mit unterschiedlicher Bewertung der Stylolithenachsen zum Spannungsplan der Störungsbewegungen erfolgte, wurden die bestehenden geometrischen Beziehungen zu den Störungszonen insgesamt als Indiz der größten, z. T. im Sinne der absolut größten Kompressionsrichtung angesehen (Parallelität mit dem Störungsverlauf - für Weitungsstrukturen: WAGNER 1964, HOFFERS 1974, JANSSEN & FRANZKE 1984; störungsnormale Orientierung - für Pressungsstrukturen: SCHRAMM 1967, BEIERSDORF 1969, HOSSEINIDUST 1980; vgl. hierzu auch JANSSEN 1985, dieses Heft).

Neuere Untersuchungen und Auswerteverfahren zur Spannungsanalyse aus Störungsflächen ANGELIER 1979; ARTHAUD 1969, ausführlich zitiert in BANKWITZ & BANKWITZ 1982, S. 9) lassen für die zumeist durch Abschiebungsstrukturen gekennzeichneten Störungszonen des Tafeldeckgebirges die Deutung der H-Stylolithen im Sinne einer absolut größten Kompressionsrichtung nicht zu. Für "normale" Abschiebungen sind die Hauptnormalspannungsachsen σ_1 - 1 vertikal und σ_3 - 3 horizontal orientiert. Streng parallel zum Streichen der Scherflächen verläuft die mittlere Hauptspannungsachse (σ_2 - 2).

Die bereits frühzeitig erkannte Problematik stylolithische Richtungsmaxima zur Kennzeichnung der Störungskinematik heranzuziehen (SCHRAMM 1967, Kap. V), wurde durch neuere Untersuchungsergebnisse weiter untermauert. Trotz einiger spezieller Formen (HOSSEINIDUST 1980) entstand das Drucklösungsgefüge, ebenso wie das Kluftinventar, im wesentlichen vor der bruchtektonischen Schichtverstellung (SCHRÖDER 1976, KURZE & NECKE 1979, HOSSEINIDUST 1980 u.a., s. auch Kap. 3.1.2.). Ein weiterer Grund für eine kritische Bewertung entsprechender Angaben besteht darin, daß ein direkter Nachweis für die zeitliche Konformität zwischen der Stylolithenbildung und der Störungsbewegung, die eine entsprechende Zuordnung voraussetzen würde, in den meisten Fällen nicht erbracht wurde. Erforderliche Kriterien wären klare Beziehungen zu tektonischen Elementen, die unmittelbar Ausdruck der Störungskinematik sind. Dazu zählen Beziehungen stylolithischer Indikationen zu fiedrig zur Scherfläche angeordneten Sekundärbrüchen, wie sie bisher nur durch die Beobachtungen von ARTHAUD & MATTAUER (1972) vorliegen.

Von einigen Autoren wurde allerdings eine generelle Zunahme besonders von störungsparallel ausgerichteten Stylolithen im Bereich größerer Störungszonen festgestellt. (HOFFERS 1974, BUCHNER 1978, FRANZKE & JANSSEN 1984, JANSSEN 1985). Das trifft aber nicht nur für Abschiebungs- und Weitungsstrukturen zu. Auch durch tangential Einengung charakterisierte Pauelemente zeigen verstärkt eine subparallele H-Stylolithenorientierung (BEIERSDORF 1969, S. 255). Die im Zusammenhang mit der Bearbeitung tektonischer Drucklösungserscheinungen durchgeführten kluftstatistischen Messungen belegen die enge Bindung der Störungszonen an regionale Hauptkluftsysteme mit vorherrschend störungsparalleler Hauptkluftausbildung (z. B. WAGNER 1964, SCHRAMM 1967, BUCHNER 1978, HOSEINIDUST 1980). In dem Vorhandensein und der Ausbildung dieser (orthogonalen) Strukturmuster im Bereich größerer Störungszonen dürfte ein wesentlicher Grund für die festgestellte Ausrichtung und für das Auftreten der H-Stylolithen liegen. Die eigenen Untersuchungsergebnisse unterstreichen, daß auch innerhalb der Störungsbereiche eine enge genetische Bindung der H-Stylolithen an Kluftsysteme besteht (Abb. 9 und 10).

Auf bestehende Beziehungen zum Kluftmuster im Störungsbereich wiesen u.a. FRANZKE & JANSSEN (1984) und erneut JANSSEN (1985) speziell am Nordharzrand hin. Es sei hier nur hinzugefügt, daß auch in diesem Bereich (Aufrichtungszone) der Einfluß frühdia-genetischer Gefügeelemente, insbesondere die Wirksamkeit der Primärklüftung - im Sinne SCHMITTS 1935! -, für die rupturale Ausgestaltung und für die Herausbildung stylolithisch suturierter Bruchgruppen bestimmend ist (Abb. 10 und Tafel 7, Bilder 6 und 7).

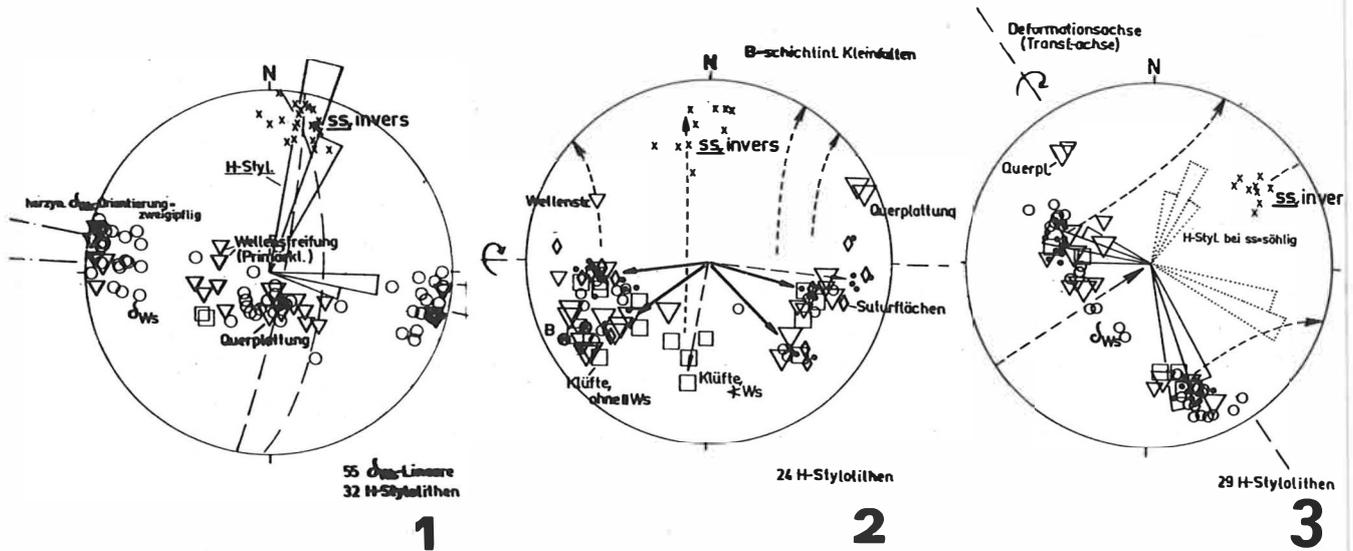


Abb. 10 Gefügediagramme aus Vorkommen im Unteren Muschelkalk aus dem Bereich der Harznordrandstörung (Aufrichtungszone).

Diagr. 1: Steinbruch nördlich Bahnhof Gernrode, Diagr. 2: Aufschluß an der Roseburg bei Rieder, Diagr. 3: Apenberg bei Cattenstedt, vgl. Tafel 7.

In den stark aufgebogenen Schichtkomplexen der Aufrichtungszone beherrscht ebenfalls das frühdia-genetische Strukturinventar das spätere Gefügebild. Die relativ einheitliche Orientierung der Wellenstreifung im fast vollständig aufgeschlossenen Profil des Unteren Muschelkalkes (Diagr. 1) findet sich in der einheitlichen Ausrichtung der H-Stylolithen am nördlichen Harzrand generell wieder (vgl. Abb. 1 in FRANZKE & JANSSEN 1984).

Eine Interpretation der stylolithischen Richtungsgruppen bleibt durch die Bindung der Stylolithen an regionale Kluftsysteme in vielen Fällen problematisch. Das gilt insbesondere dann, wenn Beziehungen zum Grundkluftmuster in "ungestörten" Bereichen bestehen (vgl. SCHRAMM 1967). Sie führen, wie die Angaben von WAGNER (1964) und SCHRAMM (1967) gegenüber den Befunden von HOFFERS (1974) und BUCHNER (1978) zeigen, zu recht widersprüchlichen Ergebnissen. Deutungen, die besonders unter Hinweis auf die unterschiedliche Streichrichtung der Horizontalstylolithen auf eine selbständige und zeitlich eigenständige Lage der größten (horizontalen) Hauptnormalspannungssachse schließen, kann nicht gefolgt werden. Die Entstehung der unterschiedlich orientierten Drucklösungsindikationen ist nicht zwanglos auf die Kinematik der jungen, vor allem jung-mesozoisch und im Tertiär wirksamen Störungszonen übertragbar.

Die Ausrichtung der Stylolithen ist für sich auch kein Indiz einer großregional wirksamen Hauptkompression, wie sie im Sinne von PLESSMANN (1972) und WUNDERLICH (1973) vertreten wird. Da die Entstehung der H-Stylolithen insbesondere an die Entwicklung der Kluftgefüge gebunden ist, müssen Stylolithen in ihrem Auftreten ebenso wie die lokal/regional verbreiteten Kluftsysteme erklärt und bewertet werden. Im Arbeitsgebiet fehlt dagegen noch eine ausreichend begründete, zeitliche und genetische Aspekte gleichermaßen berücksichtigende Erklärung für die Entstehung der suturierten Kluftgruppen. Eine paläotektonische Interpretation der Richtungsgruppen erscheint für das Arbeitsgebiet deshalb verfrüht. Auch der von JANSSEN (1985, Kap. 4 und 5.3.3.) im gleichen Heft dargestellten, durch eine mathematische Modellierung noch unterstützte Konzeption der Spannungsverteilung im Tafeldeckgebirge des Arbeitsgebietes stehen verschiedene Probleme entgegen. So liefert sie z. B. keine Erklärung für die vielfältigen, z. T. von Bank zu Bank wechselnden Richtungen innerhalb der Einzelaufschlüsse, und zwar unabhängig von der jeweiligen Position dieser Aufschlüsse. Der Nachweis einer gesetzmäßigen "Spannungsschiebung" wird im Unteren Muschelkalk durch den Einfluß der starken, fröhdiagenetischen Strukturierung besonders erschwert.

4. Faktoren und Bedeutung des Lösungstransportes

Nach den vorliegenden Angaben und Untersuchungsergebnissen sind für die Entwicklung und das Ausmaß der Drucklösungsvorgänge die gegebenen Möglichkeiten für den Lösungstransport - und weit weniger die Druckbedingungen - von entscheidender Bedeutung (Permeabilität, Porosität, "offene" oder "geschlossene" Systeme der Lösungszirkulation, Suturflächen; s. TRURNIT 1967, 1968, LANGHEINRICH & PLESSMANN 1968, de BOER 1977, HORTENBACH 1977, KURZE 1981b, NELSON 1981). Die Drucklösung kommt zum Stillstand, wenn der Austausch der Lösungen unterbunden wird (Lösungsrückstände, Zementation, Erdöl- und Erdgasfüllung, TRURNIT 1967, HORTENBACH 1977, KURZE 1981b u.a.). Wie gezeigt, besteht in den Karbonatgesteinen eine enge Beziehung zwischen dem Einsetzen von Drucklösungsvorgängen und der Herausbildung des rapturellen Flächeninventars. Entstandene verfügbare Bruchflächen schon sehr frühzeitig (intraformationelle Geröllhorizonte - ERNST & WACHENDORF 1968, S. 180; Querplattung und andere fröhdiagenetische Deformationsstrukturen, Kap. 3.1.2.), so wurden sie bereits zu diesem Zeitpunkt von Drucklösungsvorgängen erfaßt. Beispiele für postdiagenetisch wirksame Drucklösungsvorgänge und Stylolithenbildung liegen durch die Beobachtungen in Störungszonen des Languedoc vor (ARTHAUD & MATTAUER 1972). Hierzu sind auch die mit der Schieferung verbundenen Drucklösungserscheinungen in paläozoischen Grundgebirgskalken zu zählen, die Gesteine unterschiedlicher stratigraphischer Stellung gleichermaßen kennzeichnen. Die Zeitspanne für das Einsetzen der an rapturelle Gefügeelemente gebundenen Drucklösungsvorgänge ist demnach sehr groß. Bezieht man die bereits fröhdiagenetisch beginnende, aber auch durch tektonische Prozesse aktivierte Drucklösung auf Schichtfugen

mit ein, so können Drucklösungsvorgänge auf diesen Gefügeelementen prinzipiell in allen Stadien der Diagenese und darüber hinaus wirksam werden. Unter geeigneten Bedingungen (Druck, geeignetes Lösungsmittel, Lösungstransport/Lösungsmigration) ist Drucklösung ein stets möglicher und wiederholt einsetzender Vorgang. Drucklösungsvorgänge setzen besonders dann ein, wenn Deformationsprozesse strukturelle Gefügeveränderungen hervorrufen, die mit einer Erhöhung der sekundären Permeabilität (und Porosität) einhergehen. Es entstehen Flächensysteme, die durch ihre gegenseitige und ihre Vergitterung mit Schichtfugen in unterschiedlicher Stärke den Lösungstransport begünstigen (vgl. auch WAGNER 1964, S. 544; SCHRAMM 1967, S. 58 f; ARTHAUD & MATTAUER 1969, S. 743). Das unterstreicht, daß trotz einiger Einschränkungen (Wellenstreifen, Haarrisser), Angaben zur Zeitlichkeit der Drucklösungsvorgänge in der Regel auf die Altersstellung der zugehörigen rupturellen/tektonischen Flächenelemente bzw. des Gefügeprägenden Deformationsprozesses zurückgeführt werden können.

Die Möglichkeiten und Bedingungen des Lösungstransportes beeinflussen auch die Ermittlung der Drucklösungsbeträge. Für deren Mindestgröße, z.B. zur Bestimmung der horizontalen Einengung, ist die Anzahl stylolithischer suturierter Flächen ausschlaggebend (Tab. 3 in WAGNER 1964). Dabei spielt es letztlich keine Rolle auf welche Weise diese Daten gewonnen werden, also ob auf graphischem oder auf geochemischem Wege. Die Anzahl stylolithischer Flächen wird vom Flächenangebot mit bestimmt. Sie ist aber keine rein tektonische Größe (Kap. 2.3.). Wie die Ausbildung der Schieferung (BANKWITZ 1965, S. 252), so hängt auch die Klüftigkeit bzw. Kluftintensität von zahlreichen gesteinspezifischen Faktoren und unter anderem von der Schichtmächtigkeit ab (PETERSS 1980, BANKWITZ & BANKWITZ 1982). In dieser Vielfalt wirksamer, tektonisch und faziell determinierter Faktoren liegt nach Ansicht des Autors ein wichtiger Grund für die sehr unterschiedlichen Angaben über die Größe der Drucklösungsbeträge (vgl. WAGNER 1967, BEIERSDORF 1969). BUCHNER (1978, S. 4) ist deshalb voll zuzustimmen, wenn er vor einer Übertragung dieser Werte auf größere Gebiete warnt. Ähnliches gilt für die Ermittlung vertikaler Drucklösungsbeträge, deren Größe nicht nur vom Schichtabstand beeinflusst wird. Es muß entlang von Schichtfugen auch mit tektonisch aktivierten Drucklösungsvorgängen gerechnet werden.

L i t e r a t u r

- AMSTUTZ, G.D.; PARK, W.C.: Stylolites of diagenetic age and their role in the interpretation of the Southern Illinois fluorspar deposits. - *Mineralium Deposita*, 2 (1967), 1, S. 44 - 53
- ANGELLIER, J.: Determination of the mean principal directions stresses for a given fault population. - *Tectonophysics*, Amsterdam 56 (1979) 3/4, T 17 - 26
- ARTHAUD, F.; CHOUKROUNE, P.: Methode d'analyse de la tectonique cassante a l' aide des microstructures. - *Rev. Inst. France Petr.*, Paris 9/10 (1972), S. 715 - 732
- ARTHAUD, F.; MATTAUER, M.: Exemples de stylolites d' origine tectonique dans le Languedoc, leurs relations avec le tectonique cassante. - *Bull. Soc. Geol. France*, Paris 11 (1969) 7, S. 738 - 744
- Sur l' origine tectonique de certains joints stylolithiques paralleles a la stratification; leur relation avec une phase de distension (exemple du Languedoc). - *Bull. Soc. geol. France*, Paris 2 (1972) 14, S. 12 - 17

- BANKWITZ, P.: Elemente der Schiefergebirgstektonik. - Ber. geol. Ges. DDR, Berlin 10 (1965) 2, S. 249 - 263
- Einige Aspekte der Faltenbildung. - Veröff. Zentralinst. Physik der Erde, Potsdam 53 (1977), S. 43 - 67
- Über Klüfte, IV. - Z. geol. Wiss., Berlin 6 (1978) 3, S. 301 - 311
- Zu einigen Parametern der Bruchbildung. - Z. geol. Wiss., Berlin 8 (1980) 3, S. 245 - 264
- BANKWITZ, P.; BANKWITZ, E.: Rupturen IV - Praktische Anwendung der Bruchanalyse. - Exk.-führ. Gesellsch. Geol. Wiss. DDR, Berlin (1982), 30 S.
- BANKWITZ, P.; SCHROEDER, E.: Tektonische Studien in Schiefer- und Phyllitgebieten Thüringens. - Geol. Rdsch., Stuttgart 52 (1963) 1, S. 365 - 376
- BEIERSDORF, H.: Druckspannungsindizien in Karbonatgesteinen Süd-Niedersachsens, Ost-Westfalens und Nord-Hessens. - Geol. Mitt., Aachen 8 (1969), S. 217 - 262
- BOCK, H.: Zur Mechanik der Kluftentstehung in Sedimentgesteinen. - Diss. Univ. Karlsruhe (1972), 116 S.
- Das Fundamentale Kluftsystem. - Z. dt. geol. Ges., Hannover 131 (1980) 3, S. 627 - 650
- BORRADAILE, G. I.; BAYLY, M. B.; POWELL, C. McA. (Herausgeber): Atlas of deformational and metamorphic rock fabrics. - Springer Verlag; Berlin (West) - Heidelberg - New York (1982), 544 S.
- BREDDIN, H.: Quantitative Tektonik - 1. Teil. - Geol. Mitt., Aachen 7 (1967), S. 205 - 238
- BUCHNER, F.: Über Horizontal-Stylolithen im Muschelkalk des Kraichgau (SW-Deutschland) und ihr tektonischer Rahmen. - Oberrhein. geol. Abh., Karlsruhe 27 (1978), S. 1 - 9
- BUSINSKI, G. I.: O stilolitach. - Isv. Akad. Nauk. SSSR, Ser. Geol., Moskau (1961) 8, S. 39 - 57
- de BOER, R. B.: Pressure solution: theorie and experiments. - Tectonophysics, Amsterdam 54 (1977), S. 287 - 301
- ENGELS, B.: Die kleintektonische Arbeitsweise unter besonderer Berücksichtigung ihrer Anwendung im deutschen Paläozoikum. - Geol. Forschung, Berlin 13 (1959), S. 1 - 129
- ERNST, G.; WACHENDORF, H.: Feinstratigraphisch-fazielle Analyse der Schaumkalkserie des Unteren Muschelkalkes im Elm (Ost-Niedersachsen). - Beih. Ver. naturhist. Ges., Hannover 2 (1968), S. 165 - 205
- FRANZKE, H.J.; JANSSEN Chr.: Geologische Interpretation von Druckspannungsmessungen im Tafeldeckgebirge der DDR. - Z. geol. Wiss., Berlin 12 (1984) 2, S. 235 - 254
- FRIEDEL, C.-H.: Kleintektonische Analyse und Interpretation tektonischer Drucklösungserscheinungen. - wissenschaftl. Bericht, Gehren/Th. (1984), 51 S.
- GEISER, P.A.; SANSONE, S.: Joints, microfractures, and the formation of solution cleavage in limestone. - Geology, Boulder 9 (1981), S. 280 - 285
- GRÄBE, R.: Beziehungen zwischen der tektonischen und faziellen Entwicklung des Oberdevons und Unterkarbons sowie zur Genese der Eisenerze vom Lahn-Dill-Typus am NW-Rand der Bergaer Sattels (Thüringisches Schiefergebirge). - Berlin: Akademie-Verlag 1962, S. 1 - 83, (Freiberger Forsch.-H., C 140)

- GROSHONG jr., R.H.: Strain, fractures, and pressure solution in natural single-layer folds. - Geol. Soc. Am. Bull., 86 (1975a), S. 1363 - 1376
- "Slip" cleavage caused by pressure solution in a buckle fold. - Geology, 3 (1975), S. 411 - 413
- GRÜNDEL, J.; RÖSLER, H.J.: Zur Entstehung der oberdevonischen Kalkknollengesteine Thüringens. - Geologie, Berlin 12 (1963) 9, S. 1009 - 1038
- HEISE, G.: Zur Klüftung der Trias (Muschelkalk und Buntsandstein) in der Naumburger Mulde. - Unveröff. Dipl.-Arb. Geol. Pal. Inst. Univ. Halle, Halle 1966, 87 S.
- HELMSTAEDT, H.; GREGGS, R.G.: Stylolitic cleavage and cleavage refraction in lower paleozoic carbonate rocks of the Great Valley, Maryland. - Tectonophysics, Amsterdam 66 (1980), S. 99 - 114
- HOFFERS, B.: Horizontalstylolithen, Abschiebungen, Klüfte und Harnische im Gebiet des Hohenzollergrabens und ihre Altersverhältnisse. - Oberrhein. geol. Abh., Karlsruhe 23 (1974), S. 65 - 73
- HORTENBACH, R.: Drucklösungserscheinungen in Karbonaten und ihre Bedeutung. - Z. geol. Wiss., Berlin 5 (1977) 5, S. 617 - 621
- HOSSEINIDUST, S.D.: Klüfte und Stylolithen am nordwestlichen Harzrand und im Lutterer Sattel in ihrer Bedeutung für die tektonische Auflösung dieses Gebietes. - Clausthaler geol. Abh., Clausthal-Zellerfeld 36 (1980), 61 S.
- JANSSEN, Chr.: Analyse der Paläospannungsverteilung im Tafeldeckgebirge des Südtails der DDR (Horizontalstylolithen, Schallwellengeschwindigkeiten). - Diss. Zentralinst. Physik Erde, Potsdam (1983), 192 S.
- Analyse der Paläospannungsverteilung im Tafeldeckgebirge des Südtails der DDR auf der Grundlage von Untersuchungen der Horizontalstylolithen.- Veröffentlichung Zentralinst. Physik Erde AdW DDR, Potsdam (im Druck)
- KRUCK, U.: Querplattung im Muschelkalk Nordwestdeutschlands. - Mitt. geol.-paläont. Inst. Univ. Hamburg, Hamburg 43 (1974), S. 127 - 172
- KURZE, M.: Zum Problem der Entstehung von Wellenstreifen und Querplattung im Muschelkalk. - Z. geol. Wiss., Berlin 2 (1981a) 5, S. 489 - 499
- Sedimentite. - in: PFEIFFER, L.; KURZE, M.; MATHÉ, G.: Einführung in die Petrologie. - Akademie-Verlag, Berlin (1981b), 632 S.
- KURZE, M.; NECKE, G.: Horizontalstylolithen als regionalgeologische Druckspannungsindizien. - Z. geol. Wiss., Berlin 2 (1979) 5, S. 633 - 639
- LANGHEINRICH, G.; FLESSMANN, W.: Zur Entstehungsweise von Schieferungs-Flächen in Kalksteinen (Turon-Kalke eines Salzauftrieb-Sattels im Harz-Vorland). - Geol. Mitt., Aachen 8 (1968), S. 111 - 142
- MULLENAX, A.C.; GRAY, D.R.: Interaction of bed-parallel stylolites and extension veins in boudinage. - Journ. of Structural Geology, 6 (1984) 1/2, S. 63 - 71
- NELSON, R.A.: Significance of fracture sets associated with stylolite zones. - Bull. Amer. Ass. Petrol. Geol., Tulsa 65 (1981) 11, S. 2417 - 2425
- PARK, W.C.; SCHOT, E.H.: Stylolites: their nature and origin. - Journ. of Sed. Petrology, Tulsa 38 (1968) 1, S. 175 - 191
- PETERS, K.: Klüfte - Merkmale, Entstehungsdeutungen, ihre Verwendbarkeit für die Rekonstruktion von Spannungen sowie ihre Bedeutung für die Erdöl-Erdgas-Industrie. - Z. geol. Wiss., Berlin 8 (1980) 7, S. 853 - 877

- PLESSMANN, W.: Gesteinslösung, ein Hauptfaktor beim Schieferungsprozeß. - *Geol. Mitt.*, Aachen 4 (1964), S. 69 - 82
- Horizontalstylolithen im französisch-schweizerischen Tafel- und Faltenjura und ihre Einpassung in den regionalgeologischen Rahmen. - *Geol. Rdsch.*, Stuttgart 61 (1972), S. 332 - 347
- RICHTER, D.: Verkürzung von Fossilien und Entstehung von Flaser- und Knollenkalken durch Lösungsvorgänge in geschieferten kalkigen Gesteinen. - *Geol. Mitt.*, Aachen 4 (1965), S. 235 - 248
- RIGBY, J.K.: Some transverse stylolites. - *Journ. Sed. Petrology*, Tulsa 23 (1953) 4, S. 265 - 271
- SCHAD, A.: Zur Entstehung der "Wellenstreifen" im Wellengebirge. - *Cbl. Min. etc.*, Stuttgart (1933) B, S. 1 - 8
- SCHMITT, Ph.: Zur Petrogenese des fränkischen Wellenkalks. - *Chemie der Erde*, Jena 9 (1935), S. 231 - 364
- SCHNEIDER, W.: Diagenese devonischer Karbonatkomplexe Mitteleuropas (Harz, Rheinisches Schiefergebirge, Belgien). - *Geol. Jb. Reihe D*, Hannover 21 (1977), S. 3 - 107
- SCHRAMM, S.: Klüfte und Horizontalstylolithen in der südlichen Frankenalb und ihre Stellung in der jüngeren Tektonik Süddeutschlands. - *Diss. Univ. Würzburg*, Würzburg (1967), 87 S.
- SCHREIBER, A.: Zur geologischen Stellung des Wildenfelser Zwischengebirges. - *Jb. Geol.*, Berlin 1 (1967), S. 325 - 359
- SCHRÖDER, B.: Saxonische Tektonik im Ostteil der Süddeutschen Scholle. - *Geol. Rdsch.*, Stuttgart 65 (1976) 1, S. 34 - 54
- SCHROEDER, E.: Schiefergebirgstektonik und Grundgebirgstektonik in der Hirschberg-Greizer Zone (Ostthüringen). - *Geologie*, Berlin 2 (1958) 3 - 6, S. 465 - 483
- Beiträge zur Schiefergebirgstektonik in Ostthüringen. - *Abh. deutsch. Akad. Wiss.* Berlin, Kl. Chemie etc., 1965, Berlin 4 (1966), 93 S.
- SCHWAB, M.: Beiträge zur Tektonik der Rhenoharzynischen Zone im Unterharz (Habil.-Schrift 1970). - *Jb. Geol.* Bd. 5/6 für 1969/70, Berlin (1976), S. 9 - 117
- SCHWARZ, H.-U.: Sedimentary structures and facies analysis of shallow marine carbonates. - *Contr. Sedimentology*, Stuttgart 3 (1975), S. 1 - 100
- SWIDROWSKA, J.: Stylolity tektoniczne jako wskaźnik tektogenetyczny na obszarze południowozachodniego obrzeżenia Gór Świętokrzyskich. - *Przegląd Geol.*, Warszawa 29 (1980) 3, S. 159 - 164
- TRURNIT, P.: Morphologie und Entstehung diagenetischer Druck-Lösungserscheinungen. - *Geol. Mitt.*, Aachen 2 (1967), S. 173 - 204
- Druck-Lösungsstadien innerhalb der Entwicklung einer Geosynklinale. - *N. Jb. Geol. Paläont. Mitt.-heft*, Stuttgart 6 (1968), S. 376 - 384
- TRURNIT, P.; AMSTUTZ, G.C.: Die Bedeutung des Rückstandes von Druck-Lösungsvorgängen für stratigraphische Abfolgen, Wechsellagerung und Lagerstättenbildung. - *Geol. Rdsch.*, Stuttgart 68 (1979) 3, S. 1107 - 1124
- VOSSMERBÄUMER, H.: Die "Lösungsrippeln" (SCHMITT 1935) im Wellenkalk Frankens. - *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, Stuttgart 142 (1973), S. 351 - 375

- WAGNER, G.H.: Kleintektonische Untersuchungen im Gebiet des Nördlinger Rieses. - Geol. Jb., Hannover 81 (1964), S. 519 - 600
- Druckspannungsindizien in den Sedimenttafeln des Rheinischen Schildes. - Geol. Rdsch., Stuttgart 56 (1967), S. 906 - 913
- WALD, St.: Die Verbreitung und Genese der Karbonatgesteinstypen im thüringisch-vogtländischen Raum unter besonderer Berücksichtigung des Oberdevons. - Diss. Bergakademie Freiberg, Freiberg (1981), 133 Text-S.
- WALD, St.; KURZE, M.; WIENHOLZ, R.: Ausbildung und Genese oberdevonischer Kalkknollengesteine im Süden der DDR. - Z. geol. Wiss., Berlin 11 (1983) 1, S. 27 - 39
- WEBER, P.: Bildung und Regelung von Kalkknollengefügen. - Decheniana, BONN 118 (1965) 1 S. 55 - 84
- WUNDERLICH, H.-G.: Plattentektonik in kritischer Sicht. - Z. deutsch. Geol. Ges., Hannover 124 (1973), S. 309 - 328
- ZÖLLICH, M.S.: Zur Deckenfrage im Mittelharz - die tektonische Stellung der Schalsteinsättel bei Elbingerode. - Abh. preuß. geol. Landesanst. N.F., Berlin 191 (1939), 146 S.

Tafel 1: Beispiele zur Ausbildung der Schieferungsflächen in paläozoischen Kalksteinen des Arbeitsgebietes.

Bilder 1 bis 3: Obersilurischer Ockerkalk, Döschnitz/Westrand Thür. Schiefergebirge; Bild 4: Devonischer "Herzyn"-Kalk, Schweng/Unterharz; Bilder 5 u. 6: Oberdevonischer Flaserkalk, Steinbruch Häslich südl. Wildenfels/Wildenfels Zwischengebirge; Bild 7: Oberdevon Ostthüringen.

Auf den abgebildeten Schichtflächen zeigt sich die netzförmig verzweigte Anordnung der Schieferungsflächen und die teilweise gut geregelte schieferungsparallele Orientierung der Stylolithenachsen (s_1 -parallel; s_1 = zumeist Internegefüge, subparallel). Der unterschiedliche Regelungsgrad der Stylolithen, streng schieferungsparallel oder stärker streuend, wird nach dem mesoskopischen Befund von der Stärke der Schieferungsdeformation beeinflusst (Bild 1 u. 3, starke Interndeformation mit fast durchweg schieferungsparallel ausgerichteten Stylolithen). Bereits innerhalb eines Aufschlusses können diese Unterschiede deutlich werden (vgl. Bild 5, Faltenflanke und Bild 6, nahe dem Faltscharnier). Maßstab = 1 cm.

Tafel 2: Stylolithisch suturierte Schieferungsflächen im Klufianschnitt (Aufschlüsse wie in Tafel 1).

Bild 1: Oberdevonkalk (Görkwitz, vgl. Tafel 4, Bild 1 oben) und Ockerkalk; Bild 2: "Herzyn"-Kalk Schweng/Unterharz; Bild 3: Oberdevon, Stbr. Kapfenberg/östl. Thür. Schiefergebirge; Bilder 4 u. 5: Ockerkalk (a_c-, bc-Anschnitte); Bilder 6 u. 7: Stbr. Häslich/Wildenfels Zwischengebirge.

Obwohl die Schieferungsflächen erst entstanden sind als die Schichtverbiegung bereits begonnen hatte, weisen die s_1 -Flächen bei banknormaler Stellung und bei relativ geringer Schräglage zur Schichtung überwiegend schichtungskonform/schichtparallel ausgerichtete Stylolithenachsen auf (H_{s_1} -Stylolithen). Deutlich wird auch die Abhängigkeit zwischen der Anzahl auftretender Sutureflächen und dem Schichtabstand. Mit abnehmender Bankmächtigkeit vergrößert sich die Anzahl der Sutureflächen. Die unterschiedlichen Gefügebilder in den tonreicheren, brekziöseren Lagen und den kompakten Karbonatbänken (Bilder 6 u. 7, Bild 3) sind Ausdruck einer lithofaziell bestimmten Materialreaktion während der Schieferung (vgl. Tafel 3, Bilder 3 bis 5). Maßstab = 1 cm.

Tafel 3: Detailbilder zur Ausbildung der Schieferung im Kalkstein des Wildenfels Zwischengebirges

Bild 1: Fotografie zur Abb. 1 (Umbiegungsbereich einer Falte, N-Stoß, Stbr. Häslich, Erläuterung s. Abb. 1).

Bild 2: Schichtflächenanschnitt vom Scharnierbereich des im Bild 1 dargestellten Faltenteiles. Die Schieferungsflächen sind gegenüber der Ausbildung an der Faltenflanke (Tafel 1, Bild 5) einheitlicher, und zwar stärker subparallel angeordnet.

Bilder 3 u. 4: Ausschnitt aus einem mehrere Meter mächtigen Schichtpaket vom Nordstoß des Stbr. Häslich. Das sedimentäre Gefüge tritt durch die Wechsellaagerung tonreicher und karbonatischer Folgen hervor. Die Stellung der Schieferungsflächen, im Detailausschnitt (Bild 4) besser erkennbar, zeigt die inverse Lagerung der gesamten Schichtfolge im Nordteil des Steinbruches an (vgl. Abb. 1).

Bild 5: Faziell ähnlicher Bereich wie im Bild 3; Pflanzenbruch, westl. Stbr. Häslich. Das Bild verdeutlicht das unterschiedliche Materialverhalten während der Schieferung durch Brechungserscheinungen und die schieferungsparallele Einregelung einzelner Kalksteinkörper. Das primäre Gefüge, durch höheren Tonanteil gekennzeichnet, wurde dadurch lagenweise fast völlig zerstört (vgl. Taf. 2, Bilder 6 u. 7).

Bild 6: Das entlang einer Störung entstandene Brekziengefüge ist mit der größeren Anzahl verfügbarer Flächen auch stärker suturiert als der intakte Rahmen.

Tafel 4: Durch die 1. Schieferung (Transversalschieferung) geprägte stylolithische Drucklösungserscheinungen auf Schichtfugen. Die Sutureflächen werden als V_{S1} -Stylolithenflächen, die zugehörigen Stylolithen als V_{S1} -Stylolithen bezeichnet. Bild 1 oben, Bild 2 u. 3: Oberdevonischer Flaserkalk, Stbr. in Görkwitz/Görkwitz-Förmitzer Faltenzone, Thür. Schiefergebirge.

Bild 4: Stbr. "Pflanzenbruch" südl. Wildenfels/Wildenfels Zwischengebirge.

Bilder 5 u. 6: Obersilurischer Ockerkalk, Stbr. Ostausgang Döschnitz/Westrand Thür. Schiefergebirge.

Die abgebildeten Formen zeigen auf Grund der zur Schichtung fast **banknormal** einfallenden Schieferung nur gering geneigte Stylolithenachsen. Deutlicher ist der Einfluß der Schieferung erst in Tafel 5 zu erkennen. Bild 4 zeigt die Unterseite, Bild 5 dagegen die Schichtoberfläche einer stärker mergeligen Lage im Ockerkalkaufschluß Döschnitz. Die Längserstreckung der Drucklösungsformen ("Eindrücke") folgt dem Internegefüge bzw. der γ_1 -Lineation (feine Lineare).

Tafel 5: Beispiele für V_{S1} -Stylolithenflächen mit stärker geneigten, parallel zur Schieferung ausgerichteten Stylolithenachsen (Elbingeröder Riffkomplex, Unterharz).

Bild 1: Ausschnitt aus Abb. 6. Die zum Stylolithensaum parallele Lage der Schichtung ist etwas oberhalb der Suturenaht am Materialwechsel (hell/dunkel) zu erkennen. Die Bilder 2 bis 6, ebenfalls im inneren zentralen Teil des Riffkomplexes aufgenommen, zeigen z. T. ebenfalls den Materialwechsel (Schichtung) entlang der Suturenähte. Die Schieferung, durch eine starke interne Deformation gekennzeichnet, unterstreicht den Materialwechsel noch durch Brechungserscheinungen. Maßstab = 1 cm (in Bild 5: Maßst. = 2 cm).

Tafel 6: Detailbilder zum Altersverhältnis und zur Ausbildung stylolithisch suturierter Kluftsysteme im Muschelkalk.

Die Bilder 1 bis 3 sind Ausschnitte aus Abb. 7. Die ersten beiden Fotos zeigen eine feine, den H-Stylolithen parallel verlaufende Strukturierung, vermutlich Wellenstreifungslinien. Auch die Bilder 4, 5 und 8 verweisen auf die Richtungsbeziehungen zur präexistenten Wellenstreifung. In Bild 6 sind zwei unterschiedlich orientierte, stylolithische Rupturensysteme dargestellt, die durch eine kalzitgefüllte Kluft getrennt sind. Innerhalb der einzelnen Bruchsysteme ist die Ausrichtung der Stylolithen recht einheitlich und auch bei Übergangsformen (Bilder 2 u. 7) etwa orthogonal.

Tafel 7: Stylolithische Drucklösungsformen im Zusammenhang mit der Ausbildung der Querplattung zeigen die Bilder 1 bis 3. Die "H"-Stylolithen der Schaumkalkprobe in Bild 4 sind im Schrägschichtungsbereich schräg geneigt und außerhalb (unten) wieder annähernd horizontal ausgerichtet. Auch die Orientierung der V-Stylolithenachsen wird durch die Schrägschichtung beeinflusst (vgl. Bild 7 in Tafel 8). Die Bilder 5 u. 6 verdeutlichen den Einfluß der Wellenstreifung auf das spätere Bruchverhalten. Der Verlauf der Wellenstreifung (Bleistift) bestimmt nicht nur die Lage, sondern auch den Hauptkluftanteil der subparallelen Kluftnetze (oberer Steinbruch am Apenberg bei Cattenstedt, Harznordrand).

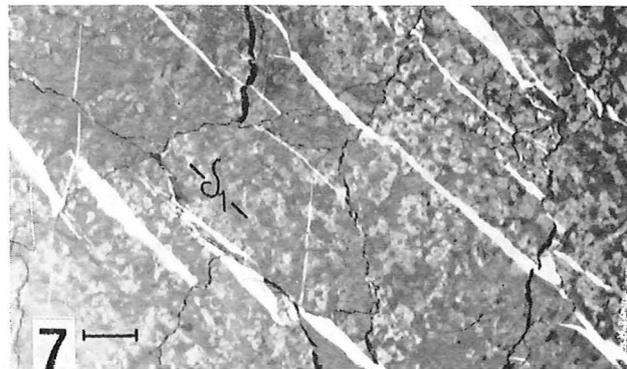
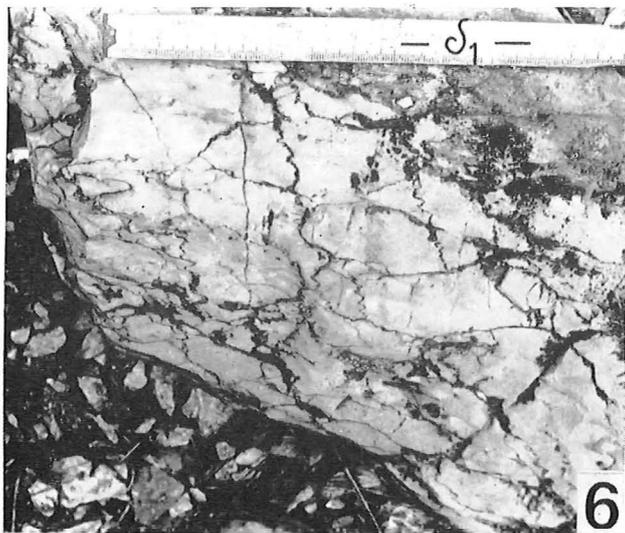
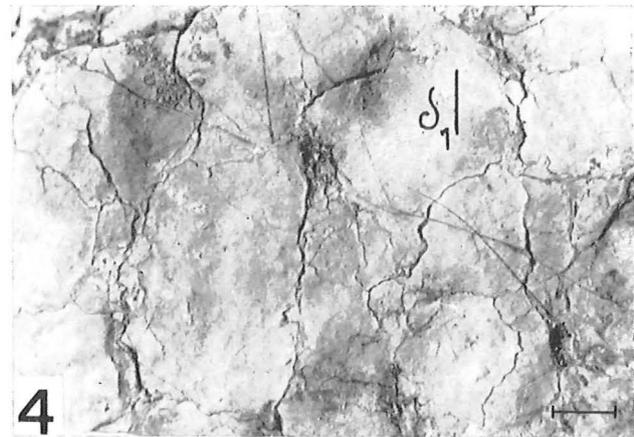
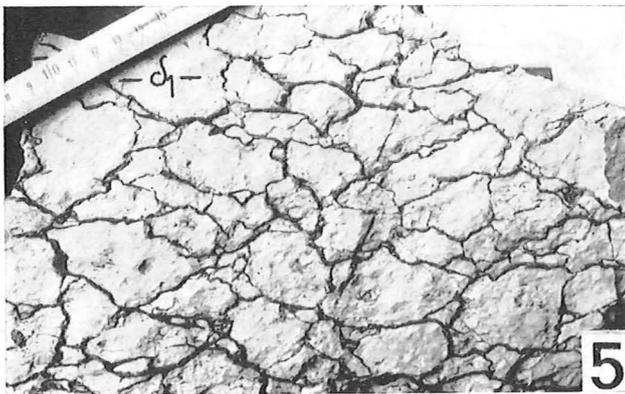
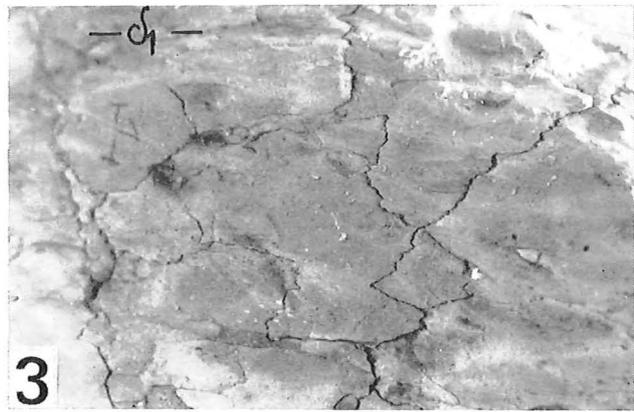
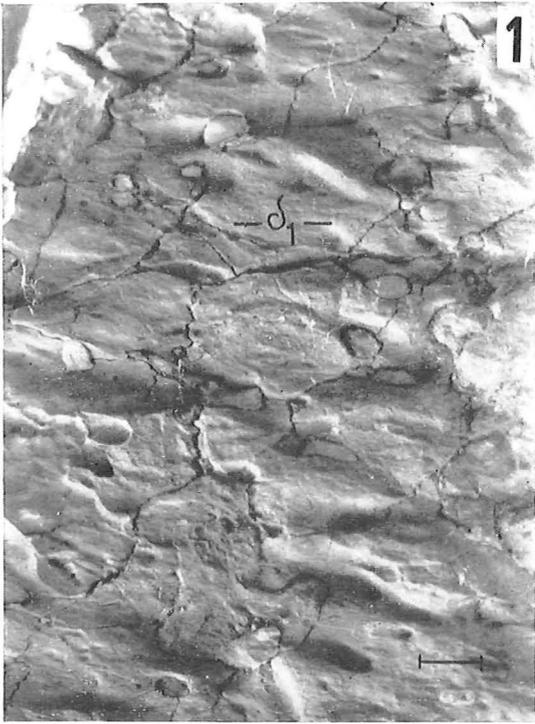
Tafel 8: Frühdiagenetische Gefügeelemente die neben geometrischen auch genetische Beziehungen zur Querplattung aufweisen.

Bilder 1 u. 2: Buchenau bei Creuzburg/Werratal; Bild 3: Lokale und auf einen Horizont beschränkte Kleinverbiegung mit zugehöriger Querplattungsschar (Roseburg/Rieder-Nordharzrand). Die Bilder 4, 5 u. 6 als Detail aus Bild 5, zeigen schicht- bzw. bankinterne Kleinverbiegungen vom Aufschluß nördlich Bahnhof Wutha bei Eisenach. Bild 7 ergänzt thematisch Bild 4 in Tafel 7.

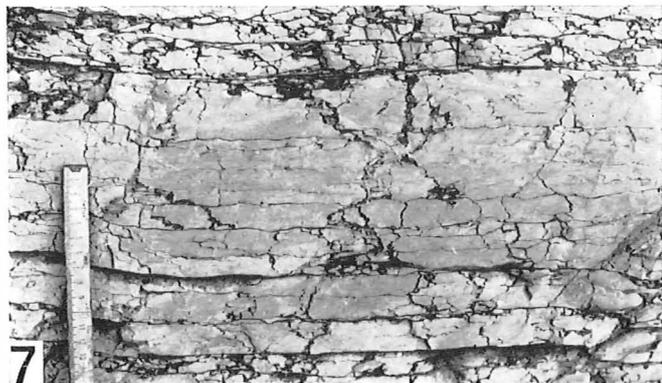
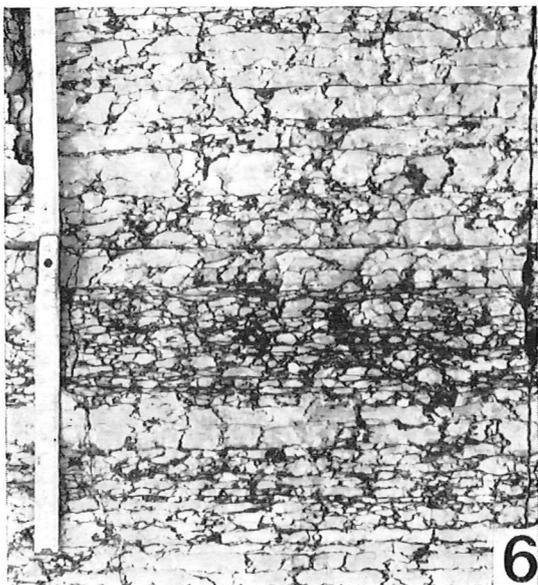
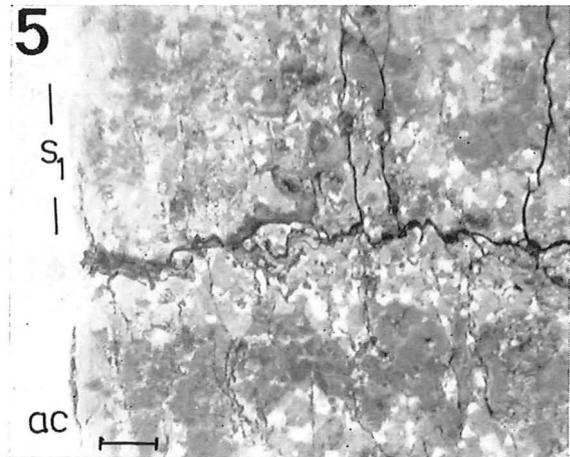
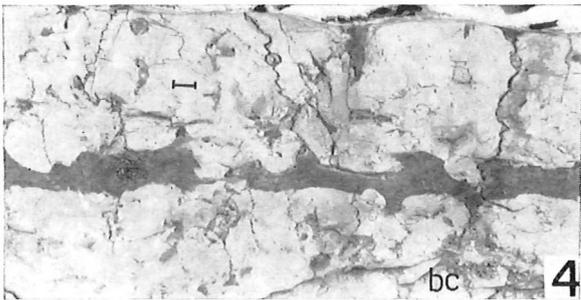
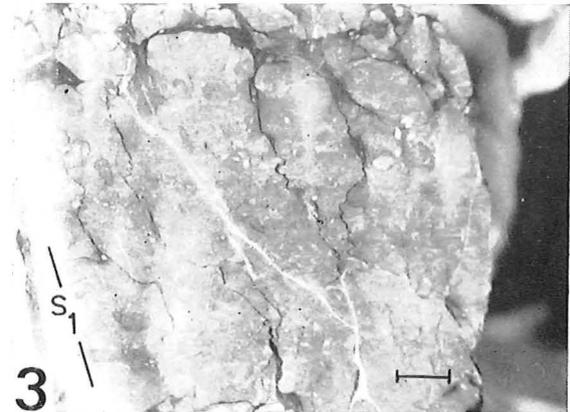
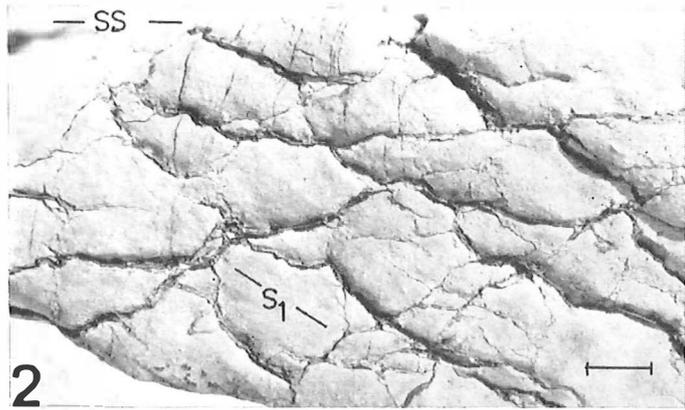
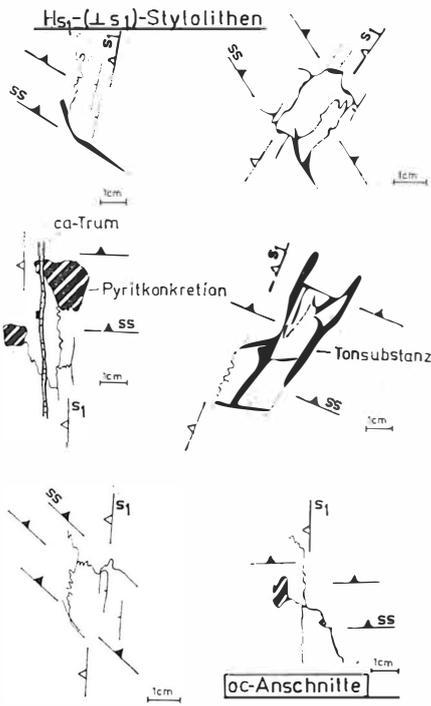
Die dargestellten schichtinternen Kleinfalten zeigen teils stärker plastische (Bilder 2 u. 5), z. T. bereits aber schon bruchhafte Verformungsbilder (Bilder 4 u. 6), die durch Drucklösungserscheinungen (Pfeile) gekennzeichnet sind. Für die Ausbildung der unterschiedlichen Deformationsbilder dürfte vor allem der Grad der Entwässerung (Plastizität) eine entscheidende Rolle spielen.

NOTIZEN

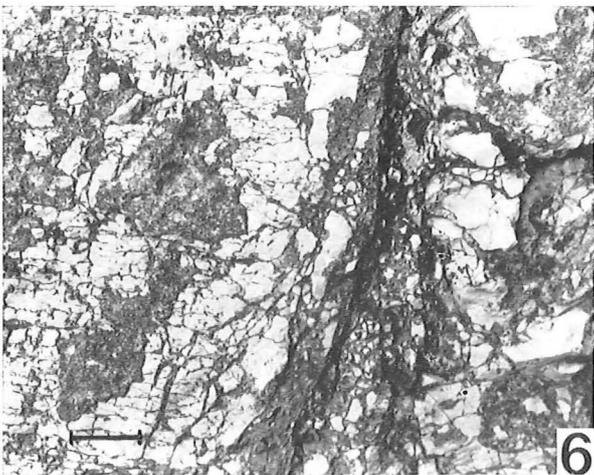
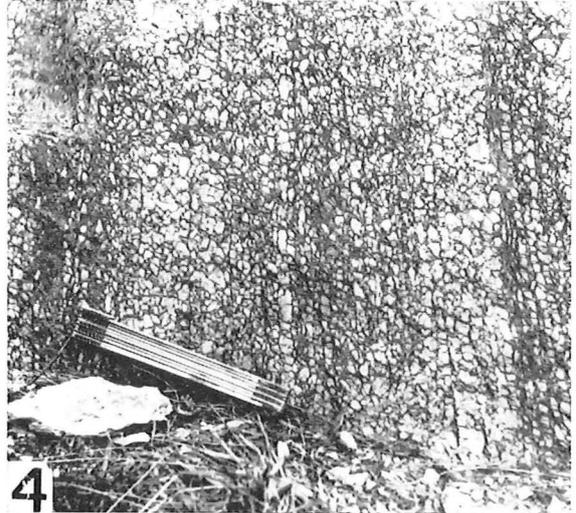
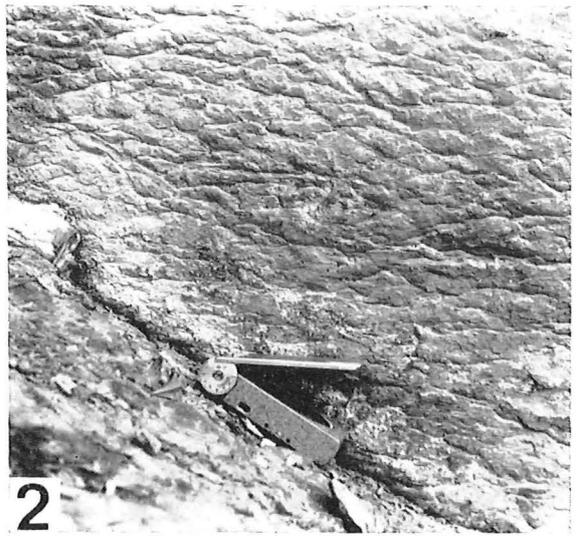
Tafel 1



Tafel 2

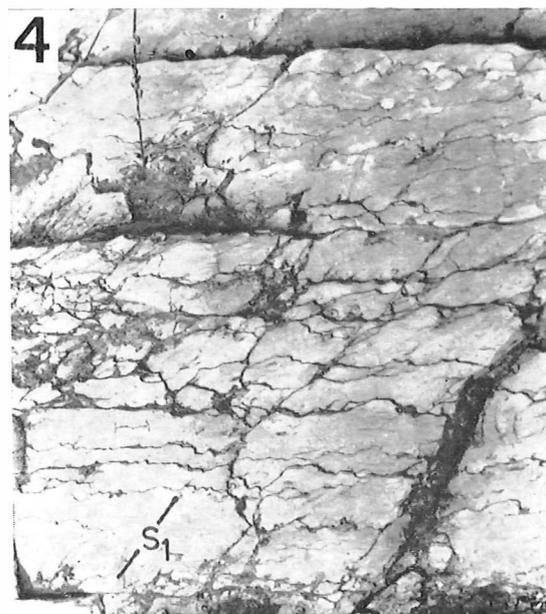
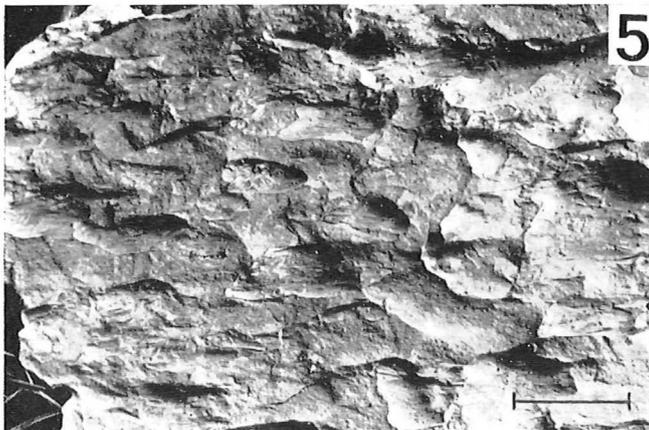
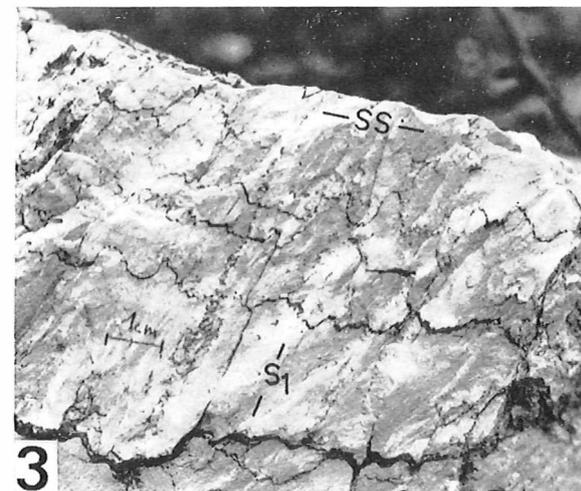
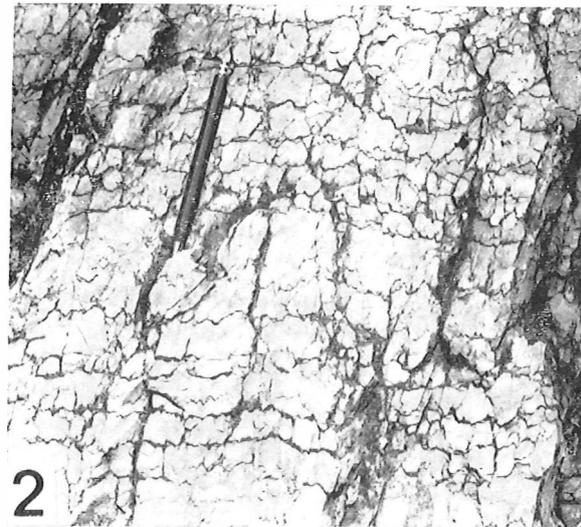
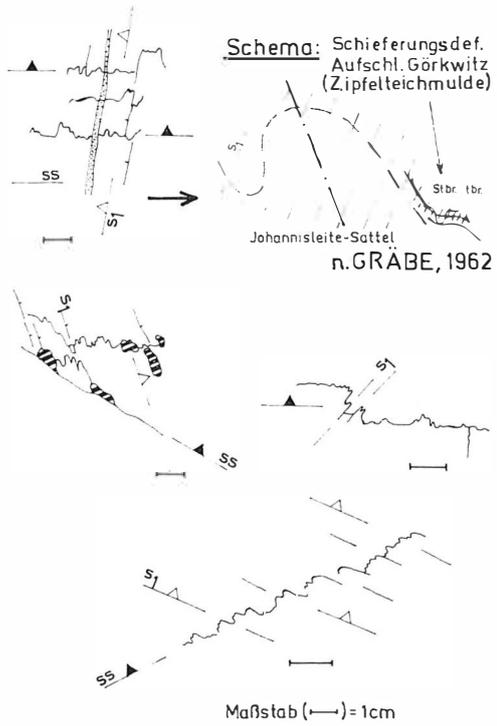


Tafel 3

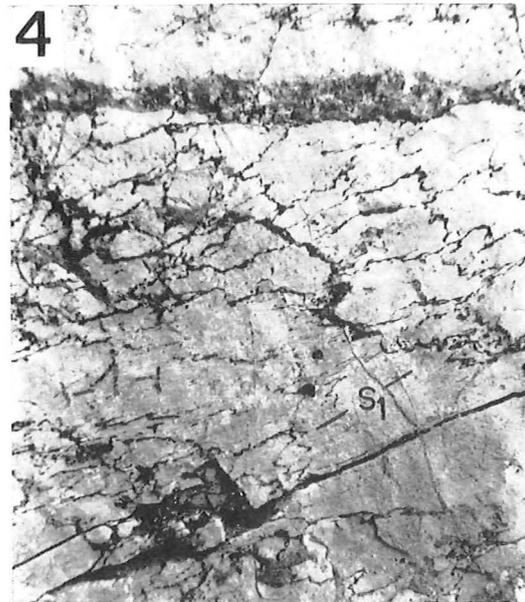
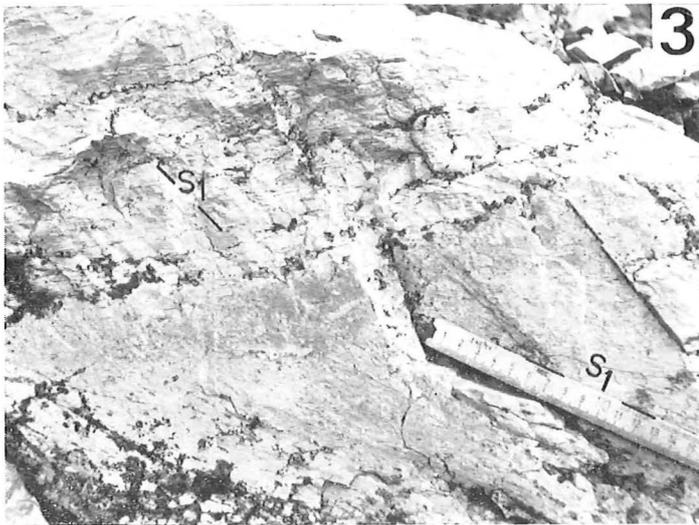
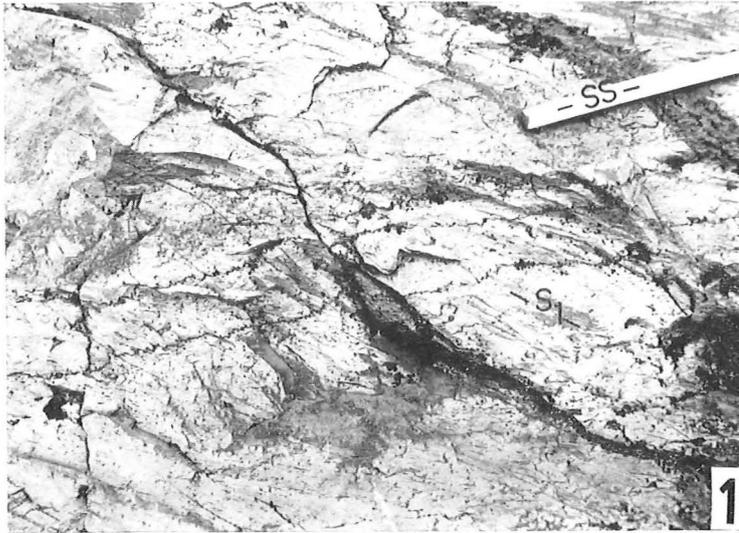


Tafel 4

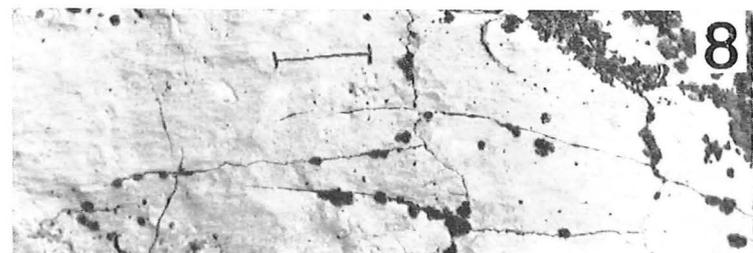
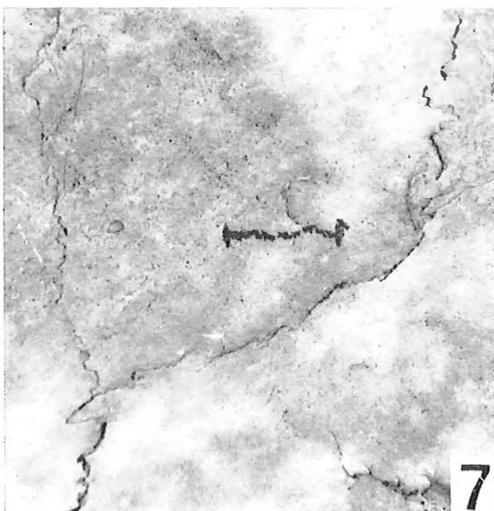
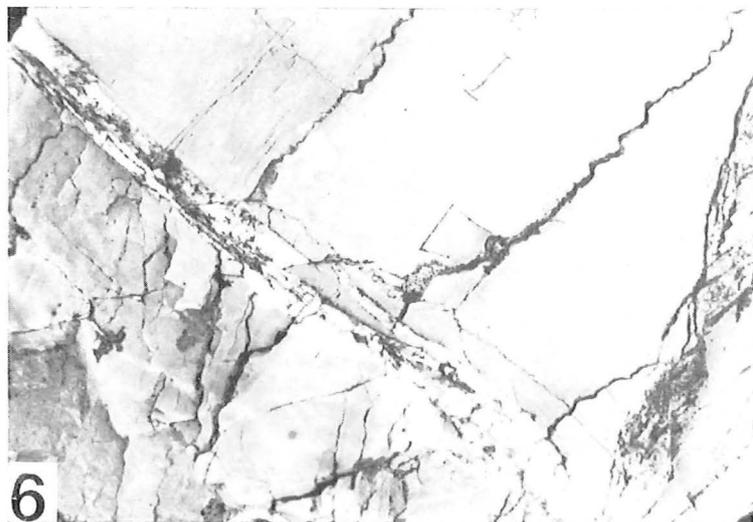
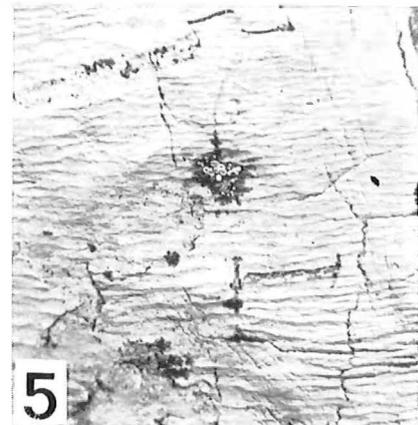
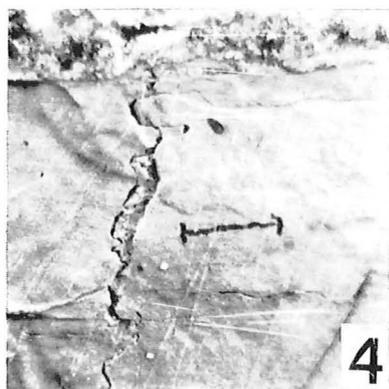
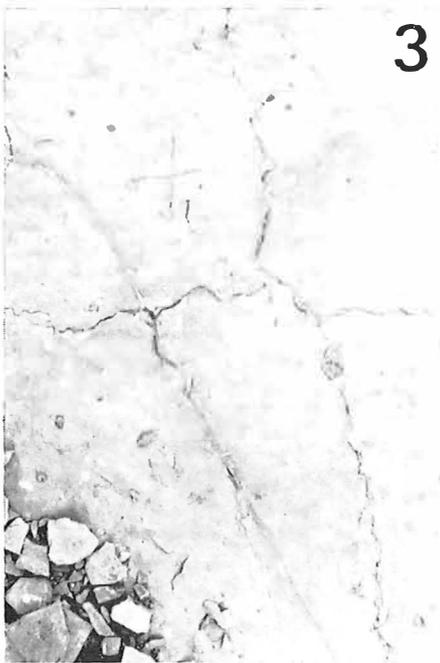
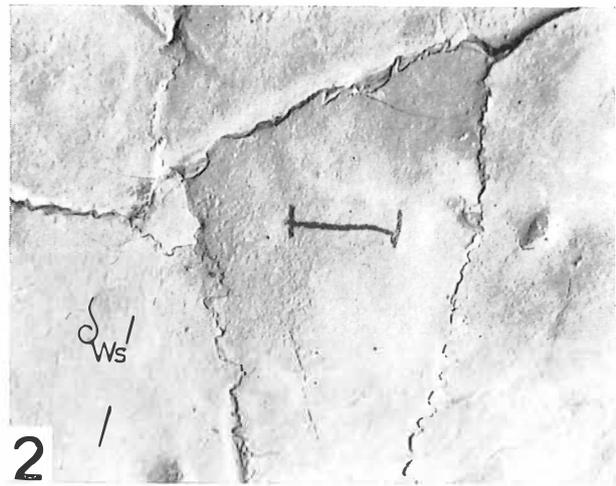
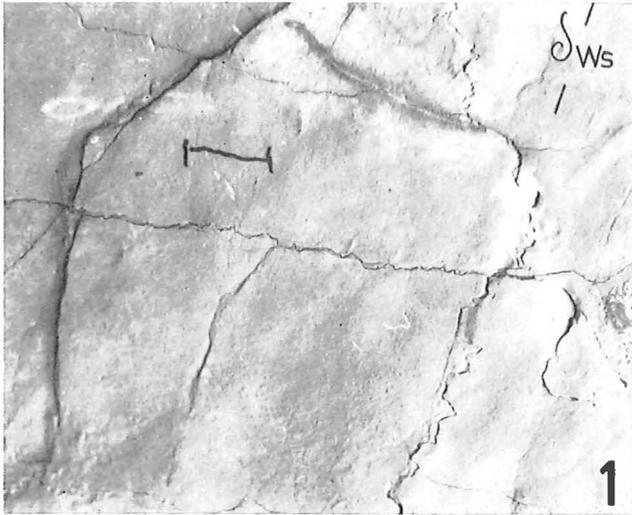
Vs₁-Stylolithen (Detailbilder)



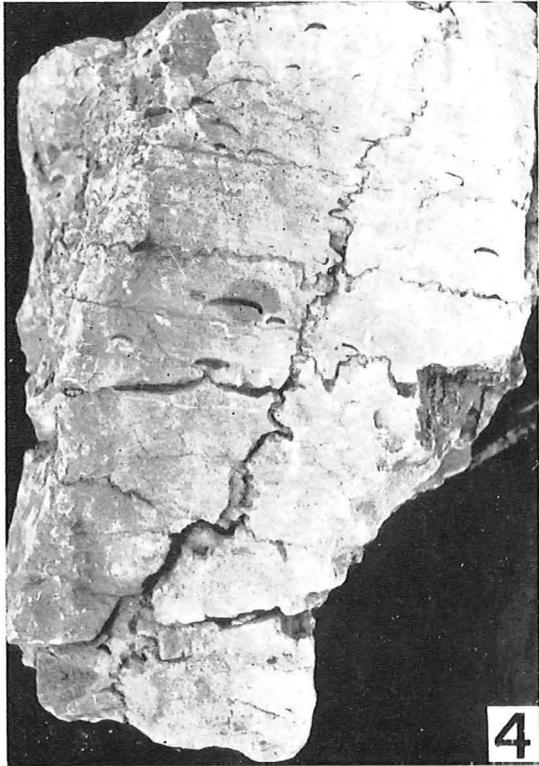
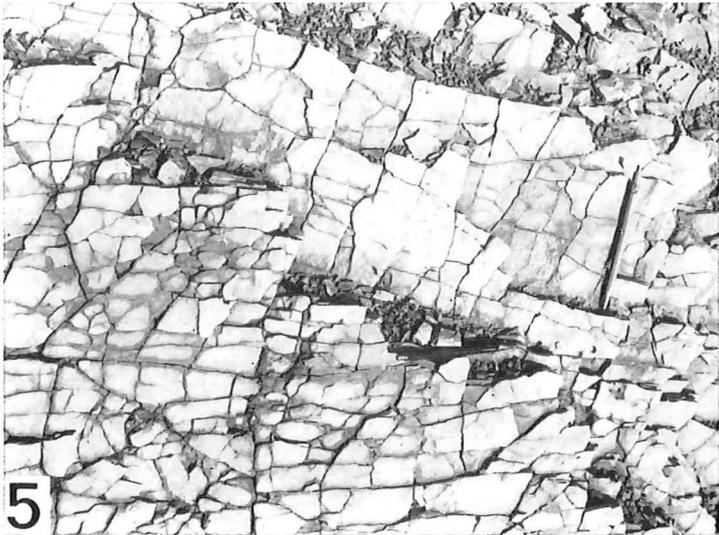
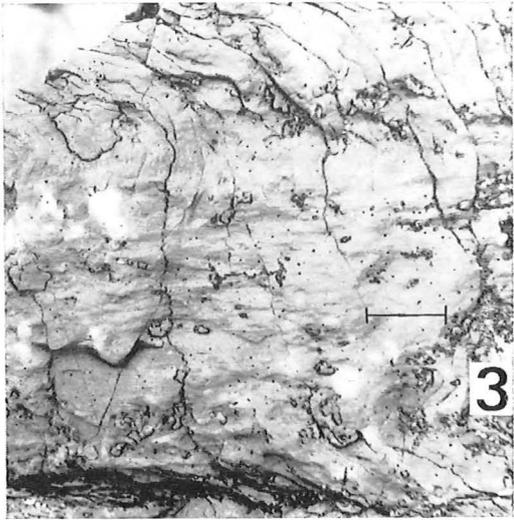
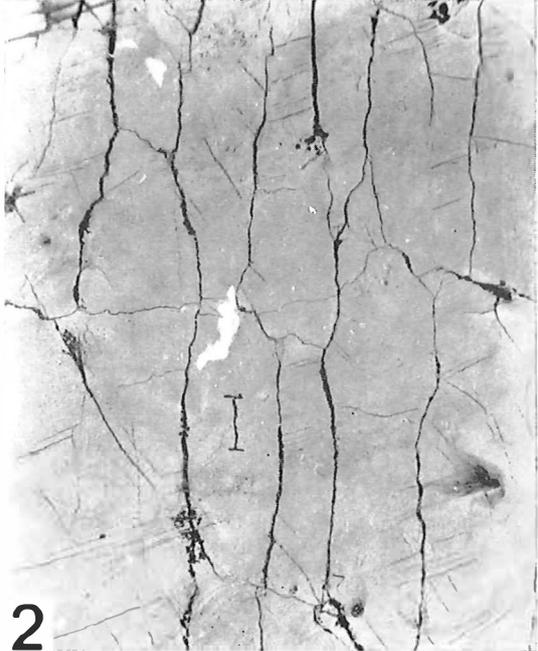
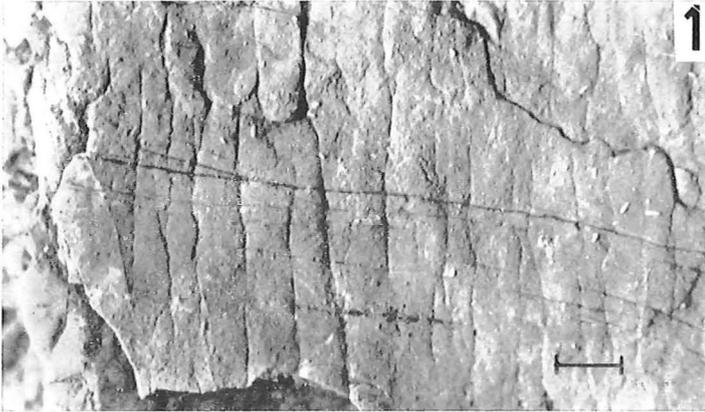
Tafel 5



Tafel 6



Tafel 7



Tafel 8

