

E. Ergänzende Untersuchungen

KTB Oberpfalz VB –

H. de Wall
G. Zulauf

KTB Report	88-6	E1-E19	13 Abb., 1 Tab.	Hannover 1988
------------	------	--------	-----------------	---------------

Die bruchhaften Verformungsgefüge im Teufenbereich 0 - 992 m

E. Ergänzende Untersuchungen

H. de Wall & G. Zulauf *

INHALTSVERZEICHNIS

- E. 1. Einführung
 - E. 1. 1. Harnischflächen als Anzeiger bruchhafter Deformation und ihre Verwendung als Schersinnindikatoren
 - E. 1. 2. Meßverfahren
 - E. 1. 3. Entwicklung eines Meßinstrumentes
- E. 2. Ergebnisse der Messungen
 - E. 2. 1. Charakteristik der Verschiebungsflächen
 - E. 2. 2. Mineralisationen auf den Harnischflächen
 - E. 2. 3. Altersabfolgen verschiedener Bewegungssysteme
- E. 3. Schlußfolgerung
- E. 4. Literaturverzeichnis

* Anschrift der Autoren: Dipl.-Geol. H. de Wall, Institut für Geowissenschaften und Dynamik der Lithosphäre, Universität Göttingen, Goldschmidtstr. 3, 3400 Göttingen; Dipl.-Geol. Dipl.-Ing. G. Zulauf, Geol.-Paläont. Inst. Universität Frankfurt a.M., Senckenberganlage 32, 6000 Frankfurt a.M.

E. 1. EINFÜHRUNG

E. 1. 1. Harnischflächen als Anzeiger bruchhafter Deformation und ihre Verwendung als Schersinnindikatoren

Die im Teufenbereich 0 - 992 m reichlich vorhandenen Harnische weisen zusammen mit den ebenfalls häufig vorkommenden Kataklasiten auf intensive Deformation im spröden Krustenstockwerk hin.

Die Harnische bieten als Oberflächen von Störungen das beste Mittel, um die Bewegungsrichtung und manchmal auch den Bewegungssinn der verschobenen Blöcke zu erfassen (PETIT 1987). Sie sagen jedoch wenig über Deformationsrate, inkrementellen und totalen Versatz aus (MEANS 1987).

Die gewöhnlich vorhandene Harnischstriemung verläuft parallel zur Bewegungsrichtung der verschobenen Blöcke. Im untersuchten Teufenbereich spielen für die Bildung der Striemung vor allem das Einfräsen von harten Partikeln in die Verschiebungsflächen (vgl. ENGELDER 1974) oder Faserwachstum von Kristallen, parallel zum jeweiligen Versatz, die wichtigste Rolle. Über weitere Möglichkeiten zur Bildung von Striemungen auf Harnischen (Trümmerstreifen, Stylolithenbildung etc.), die hier nur untergeordnet in Frage kommen, siehe MEANS (1987).

Bei der Fasermineralisation sind vor allem Calcit und Chlorit zu nennen. Die häufig vorkommenden Graphitharnische sind z.T. als Spiegelharnische ausgebildet und zeigen keinerlei Striemung. Eine Festlegung der Bewegungsrichtung ist dann nicht möglich.

Schwieriger als die Bestimmung der Bewegungsrichtung ist die Festlegung des Bewegungssinns. Gründe hierfür sind vor allem das häufige Fehlen der hierfür notwendigen Stufen auf den Harnischflächen, vor allem bei solchen mit Graphit, Chlorit oder Laumontit als Mineralisation.

NORRIS & BARRON (1969) unterscheiden zwischen angelagerten Stufen (accretion steps), die aus zerriebenem Gesteinsmaterial (fault gouge) oder neu gebildeten Mineralen aufgebaut sind und Bruchstufen (fracture steps), die durch Abtrennung der beiden Schollen oder durch sekundäre Störungen entstehen können. In unserem Falle handelt es sich vorwiegend um angelagerte Stufen (accretion steps).

Daß bei der Bestimmung des Bewegungssinns unter Zuhilfenahme dieser Stufen Vorsicht geboten ist, betonen schon PATERSON (1958) und TJIA (1964). GAY (1970) stellt fest, daß bei fehlender Fasermineralisation (d.h. bei ausschließlichem Vorhandensein von gouge) kongruente und inkongruente Formen der Stufen vorkommen können. Im ersten Fall weisen die steilen Flächen der Stufen in die Bewegungsrichtung der gegenüberliegenden Scholle. Im zweiten Fall zeigen sie in die entgegengesetzte Richtung. Für die Festlegung des Bewegungssinns wurden deshalb lediglich Harnischflächen mit Fasermineralisation herangezogen. Diese können als kongruente Formen der Stufen angesehen werden (PETIT 1987). Als besonders geeignet erwiesen sich die oft vorhandenen Harnischflächen mit

Calcit, da diese in der Regel prägnante Stufen aufweisen. Bei chloritbesetzten Harnischflächen sind die Stufen meist schlecht ausgeprägt oder sie fehlen ganz.

Ein weiteres Hilfsmittel zur Bestimmung des Bewegungssinns sind sekundäre Brüche vom Typus Riedel, deren relative Lage zur Verschiebungsfläche den Bewegungssinn anzeigt.

Mehr als eine Striemung tritt im untersuchten Teufenbereich vor allem in den mit Graphit belegten Harnischflächen auf. RAMSAY & HUBER (1987) warnen in solchen Fällen vor der leichtfertigen Festsetzung der Bewegungsrichtung anhand des jüngsten, prägenden Linears, da dies nicht zwangsläufig parallel zum Gesamtbewegungsvektor verlaufen muß.

E.1.2. Meßverfahren

Die Raumlage der Harnischflächen und - lineare wurde am Bohrkern mit einem Geologenkompaß gemessen, wobei die bei der Kernaufnahme am Bohrkern angebrachte Orientierungslinie jeweils nach N zeigte. Zur Vertikalstellung der Bohrkern während der Messung dienten PVC-Sanitärrohre.

E.1.3. Entwicklung eines Meßinstruments

Die oben beschriebene Meßmethode hat den Nachteil, daß sie dem magnetischen Einfluß (z.B. Versorgungsleitungen, Wandarmierung des Feldlabors) unterliegt. Zudem sind zu einer Messung immer zwei Personen erforderlich.

Um die Messung von diesen Nachteilen freizuhalten, wurde von Dr. A. Vollbrecht und H. de Wall (Inst. f. Geol. u. Dynamik d. Lithosphäre, Göttingen) ein Gerät (Abb. E.1.1.) konstruiert, das folgende Vorteile aufweist:

- die Messung wird von magnetischen Feldern nicht beeinflusst;
- da das Gerät aus Aluminium besteht, kann es bei den Wiederholungsmessungen der Geophysiker hinsichtlich der remanenten Magnetisierung nicht mehr zu Beeinträchtigungen durch unseren Meßvorgang kommen;
- die Messung kann am liegenden Kern durchgeführt werden, so daß auf die bisher notwendige zweite Person zur Vertikalstellung des Bohrkerns verzichtet werden kann;
- der Bohrkerndurchmesser spielt für die Messung keine Rolle.

Gerät zum Einmessen von Flächen und Linearen am Bohrkern „Goniofix“

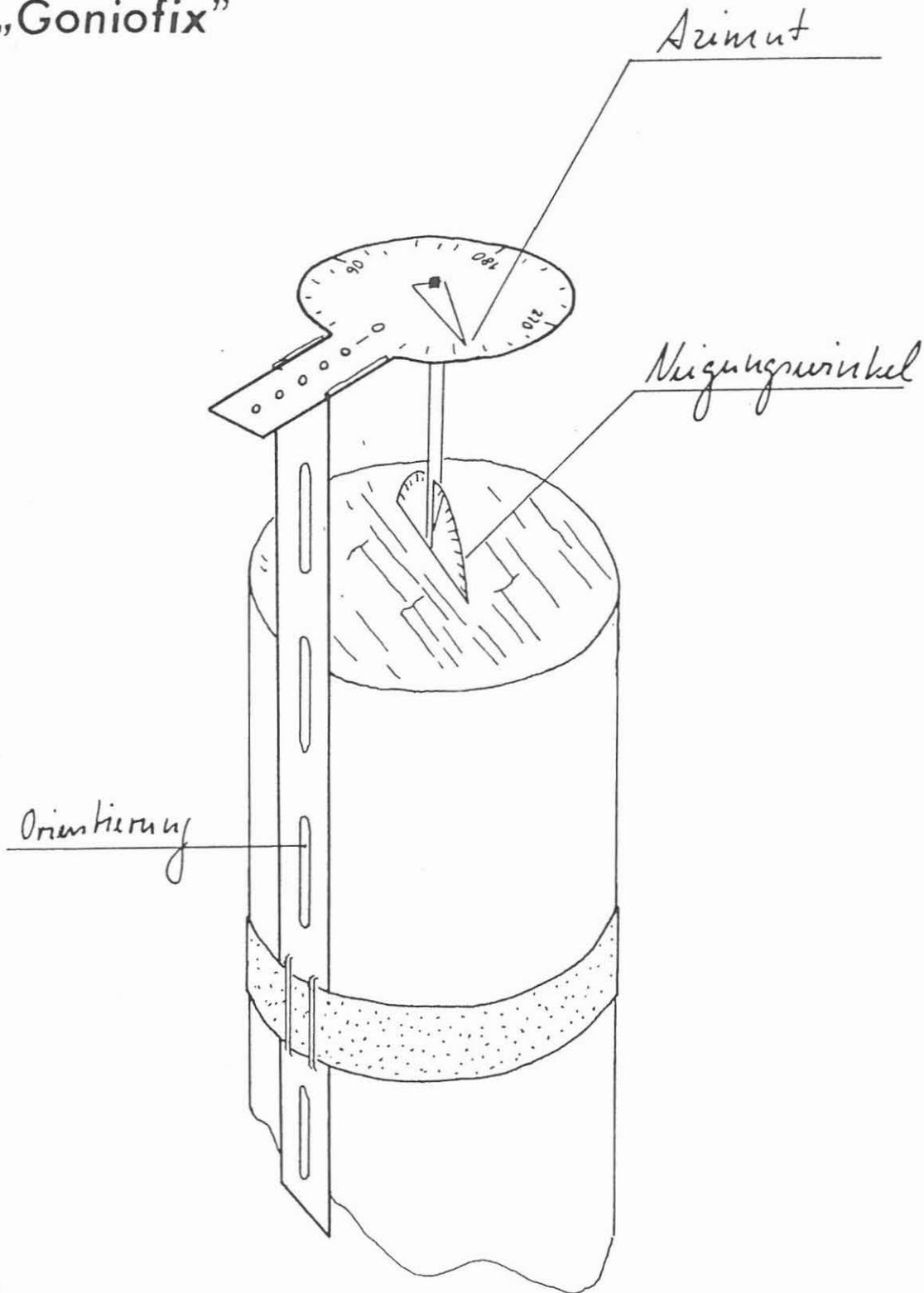


Abb. E.1.1: Messgerät

E.2. Ergebnisse der Messungen

E.2.1. Charakteristik der Verschiebungsflächen

Wegen der fehlenden Rückorientierung der Bohrkerne kann eine definitive Raumlage der gemessenen Flächen nicht wiedergegeben werden. Es ist jedoch möglich, anhand der gemessenen Einfallswinkel von Harnischflächen und -linearen, unter Einbeziehung des Verschiebungssinns, eine vorläufige Statistik hinsichtlich der Bewegungsmuster zu erstellen.

In Abb. E.2.1 sind in einem Diagramm sämtliche im Teufenbereich 0 - 992 m gemessenen Einfallswinkel der Harnischflächen gegen die Einfallswinkel der zugehörigen Lineare (Harnisch-

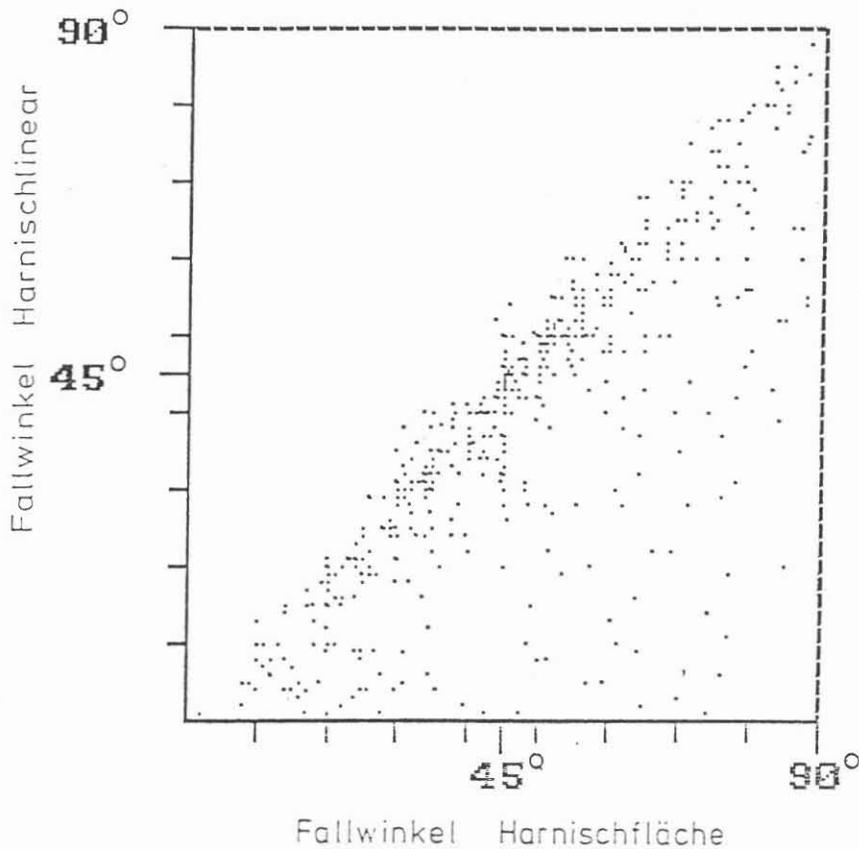


Abb. E.2.1: Darstellung sämtlicher gemessener Verschiebungsflächen aus dem untersuchten Teufenbereich. Zur Erläuterung vgl. Abb. E.2.2.

striemung) aufgetragen. Eine Erläuterung zu dieser Darstellung gibt Abb. E.2.2. Die höchste Punktdichte liegt im Bereich zwischen 30° Einfallswinkel (Fläche und Linear) und 60° Einfallswinkel (Fläche und Linear). Es handelt sich hierbei um Ab- bzw. Auf- und Überschiebungen, bei denen die Einfallswinkel von Fläche und Linear i.d.R. um maximal 10° voneinander abweichen (dip-slip fault). In geringerer Anzahl treten flachliegende Verschiebungsflächen und steilstehende Störun-

gen mit Vertikalversatz auf. Relativ selten sind Blattverschiebungen und Schrägaufschiebungen bzw. -abschiebungen.

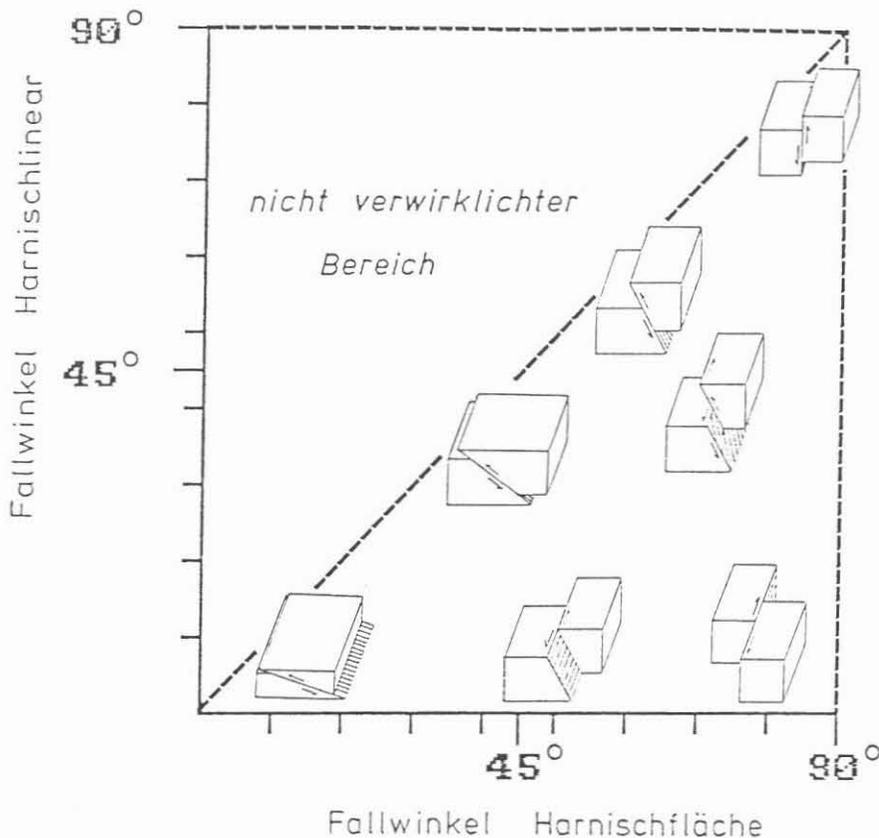


Abb. E.2.2: Erläuterungsschema zu den Abb. E.2.1, E.2.3. u. E.2.4. In dem Diagramm sind die jeweiligen Bewegungsmuster (hier exemplarisch als Aufschiebungen) eingetragen. Diese ergeben sich, wenn man das Einfallen der Verschiebungsfläche gegen das Einfallen des zugehörigen Linears aufträgt.

Die Häufigkeit von Ab- und Aufschiebungen in Abhängigkeit von der Teufe ist aus Tab. E.2.1a-d zu entnehmen.

Im Teufenbereich 0 bis 535 m treten ca. 90 % Auf- und Überschiebungen auf, welche in Abb. E.2.3 dargestellt sind. Die meisten dieser Flächen fallen zwischen 20° und 60° ein. Die jeweils zugehörigen Lineare weisen ähnliche Werte auf. Es liegen also in der Mehrzahl flache Überschiebungen bis Aufschiebungen vor (vgl. Abb. E.2.2). Wesentlich seltener sind steile Aufschiebungen und Schrägaufschiebungen.

Von 535 bis 650 m nehmen die Abschiebungen im Vergleich zu den Aufschiebungen immer mehr zu, und im Teufenbereich 650 bis 710 m treten beide etwa in gleicher Anzahl auf.

Ab 710 m beobachtet man mit zunehmender Teufe wieder vorwiegend Harnischflächen mit aufschiebendem Charakter.

Ab 770 m sind in Gneisen häufig Verschiebungen parallel zur Foliation feststellbar. Aufgrund fehlender Stufen auf den

vorwiegend mit Chlorit besetzten Harnischflächen läßt sich bis ca. 835 m kein Schersinn feststellen.

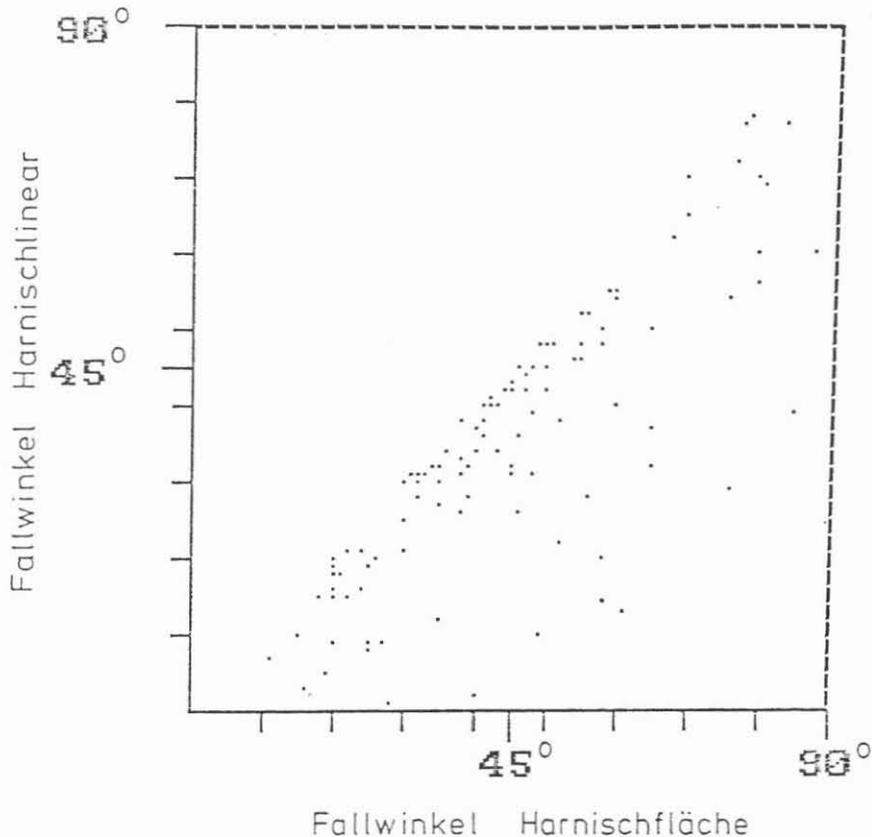


Abb. E.2.3: Darstellung der im Teufenbereich 0 - 535 m auftretenden Aufschiebungen. Zur Erläuterung vgl. Abb. E.2.2.

Von 835 bis ca. 850 m überwiegen Aufschiebungen, denen dann bis 950 m fast ausschließlich parallel zur Foliation verlaufende Abschiebungen folgen. Aus Abb. E.2.4 läßt sich entnehmen, daß diese Abschiebungen vorwiegend Einfallswinkel (für Flächen und zugehörige Lineare) von 40° bis 70° aufweisen. Ab 950 m treten wieder gehäuft Harnischflächen mit aufschiebendem Bewegungssinn auf.

Die unterschiedliche Lithologie bedingt die relativ große Vielfalt in der Geometrie und Ausbildung der Verschiebungsflächen.

In den gebänderten Amphiboliten und Gneisen haben die Bewegungen häufig parallel zur Foliation stattgefunden (Abb. E.2.5). Hierbei blieb der moderate Wechsel im Einfallen der Foliation (ca. 45° - 65°) ohne Einfluß, was mit den Feststellungen von PATERSON (1978: pp44) übereinstimmt. Er bemerkt, daß nur bei einer erheblichen Abweichung (Winkel: Foliation/Scherfläche aufgrund Coulomb-Bedingung) Scherfläche und Foliation nicht zusammenfallen. Neben der Foliation wurden im

untersuchten Teufenbereich die Grenzflächen von Aplit- und Quarz-Feldspat-Gängen zum Nebengestein als bevorzugte Bewegungsflächen benutzt.

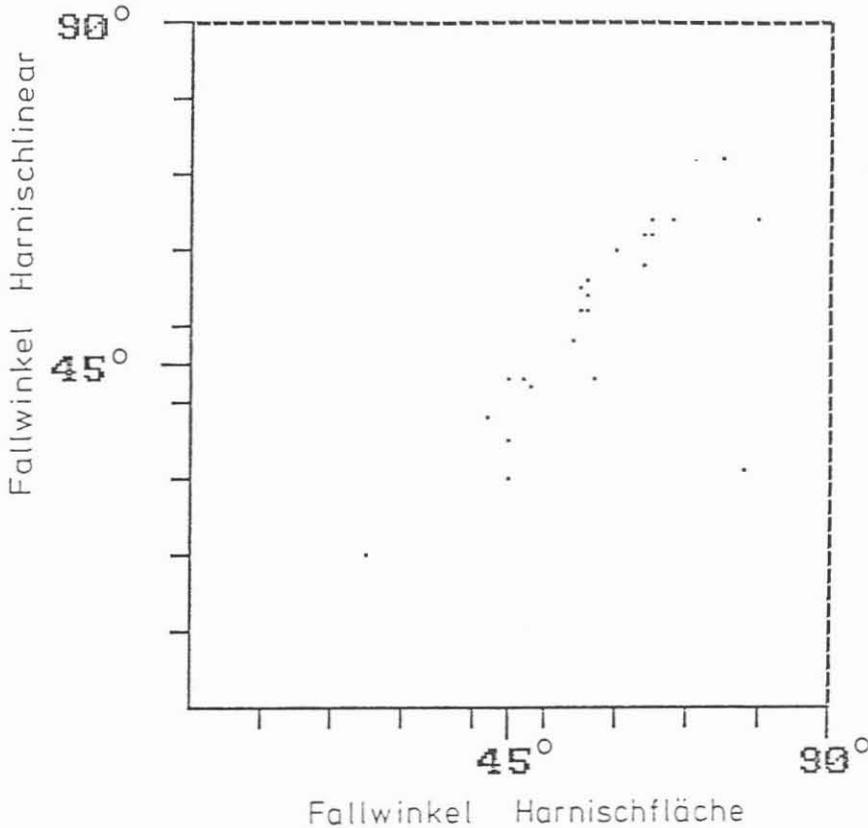


Abb. E.2.4: Darstellung der vorwiegend foliationsparallel verlaufenden Abschiebungen im Teufenbereich 850 - 950 m. Zur Erläuterung vgl. Abb. E.2.2.

Es ist nicht auszuschließen, daß die Verringerung der Kataklyse ab ca. 530 m abwärts mit der gut ausgeprägten und häufig engständigen Foliation in den hier vorhandenen Gneisen zusammenhängt. Die zahlreichen Schieferungsflächen können einen erheblichen Betrag der spröden Verformung aufgenommen haben, selbst wenn die Verschiebung an den jeweiligen Flächen nur gering war.

In den massigen Gesteinen (Amphibolite z.T., Quarzdiorit, feinkörnige Gneise) finden sich häufig konjugierte Scherflächen (Abb. E.2.6). Anstatt des penetrativen Bruches kann es auch zu gestaffelten, fiederspaltenähnlichen Rissen kommen (Abb. E.2.7), die bei 771 m nach RDA-Analyse mit Laumontit verfüllt sind. Ist ein Bruch entstanden, so dient dieser bei späteren Bewegungen häufig wieder als Bewegungsbahn, da er eine Zone relativer Entfestigung im Gestein darstellt. Auf diese Art und Weise können sich die breiten Kataklysezonen entwickelt haben, die vor allem in dem amphibolitreichen Teufenabschnitt von 0 - 530 m vorzufinden sind.

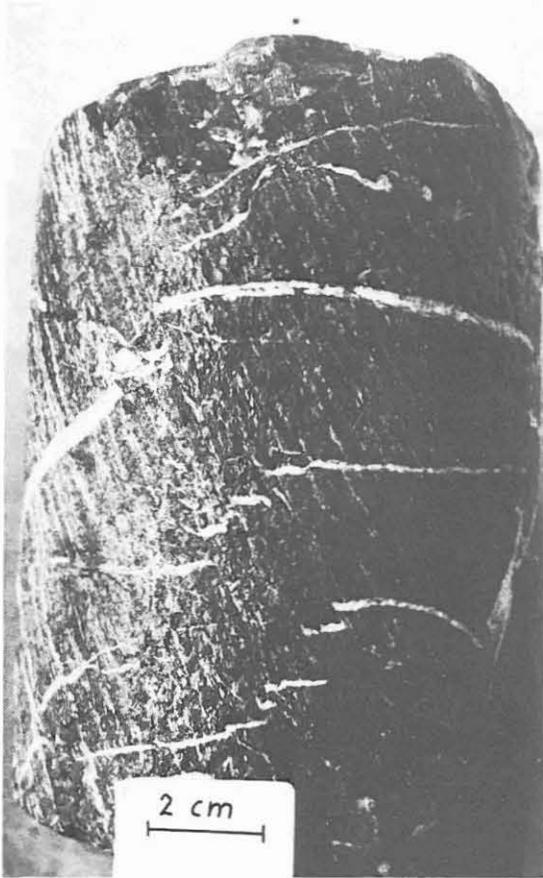


Abb. E.2.5: Foliationsparallele Verschiebungsflächen im gebänderten Amphibolit. Versetzt werden mit Calcit verfüllte Extensionsrisse. Kernstück 12B5, ca. 110 m.



Abb. E.2.6: Konjugierte Scherflächen im Quarzdiorit. Kernstück 83B6c, ca. 512 m.

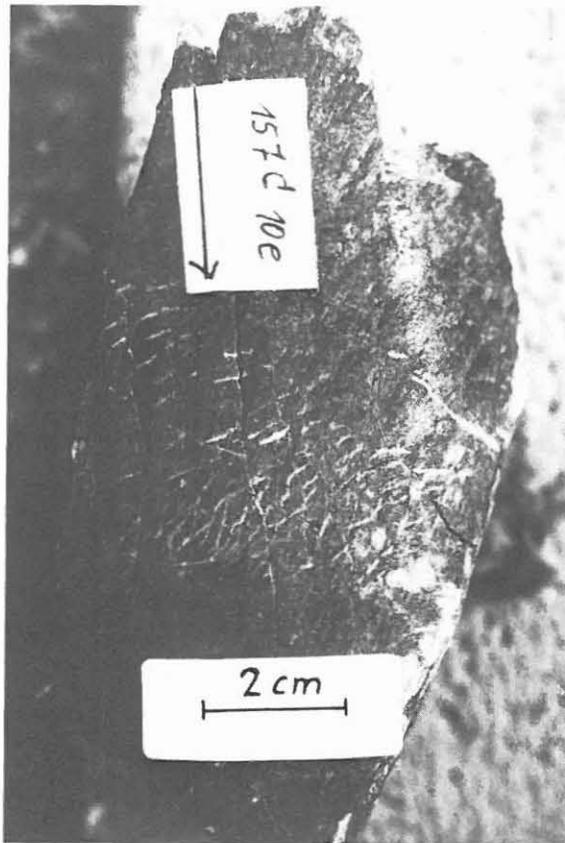


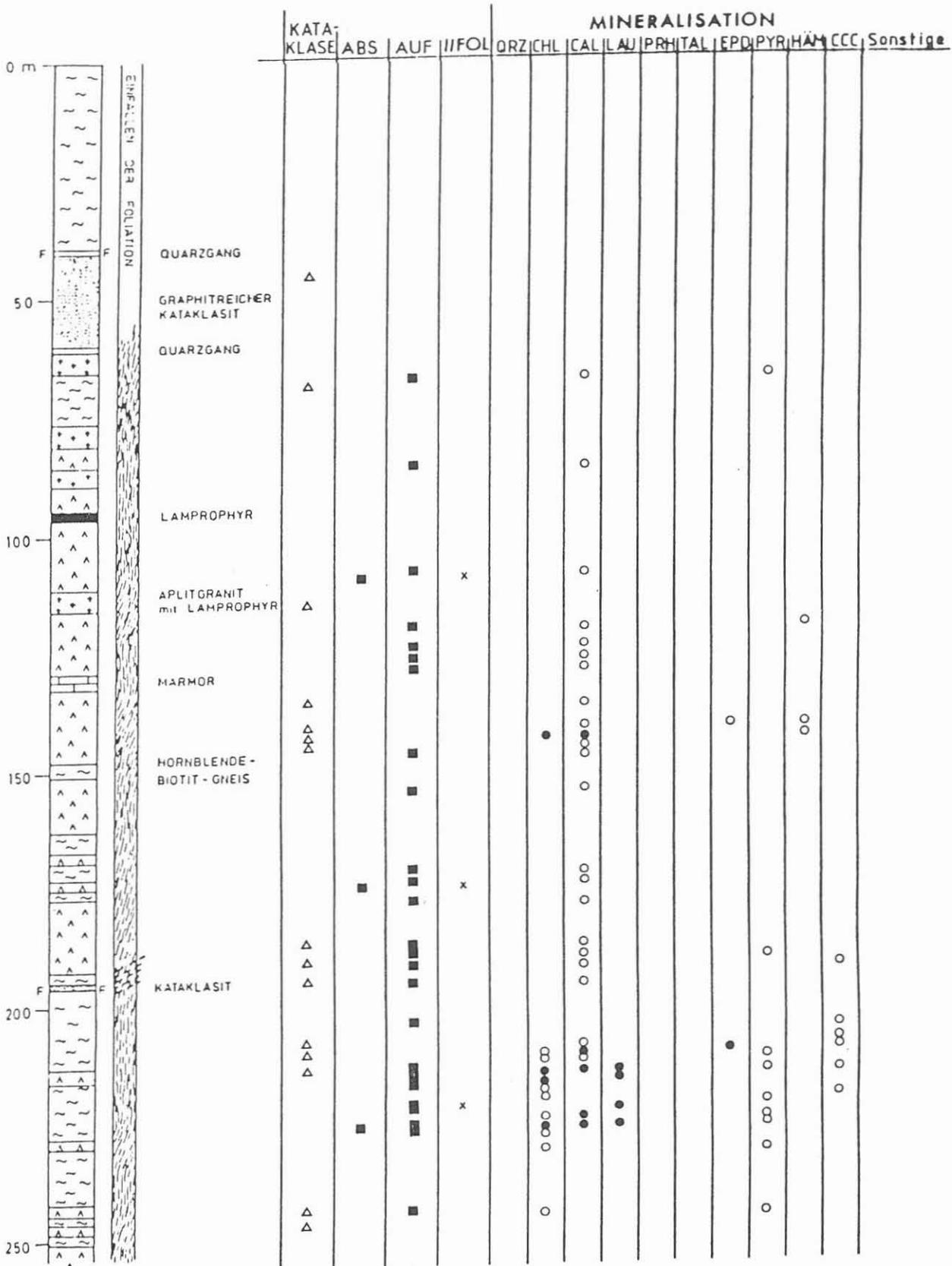
Abb. E.2.7: Mit Laumontit verfüllte, z.T. fiederspaltenartige Extensionsrisse im feinkörnigen Gneis. Kernstück 157C10e, ca. 771 m.

E.2.2. Mineralisation auf den Harnischflächen

Bei der Einmessung der Verschiebungsflächen wurden neben Kataklastenmaterial unterschiedliche Mineralisationen als Harnischbeläge festgestellt. Im Falle einer makroskopisch nicht eindeutigen Mineralansprache wurden Proben entnommen, die dann zur röntgendiffraktometrischen Untersuchung im KTB-Feldlabor (Bearbeiter: Herr Stroh) weitergeleitet wurden. Insgesamt wurden 45 Proben qualitativ analysiert.

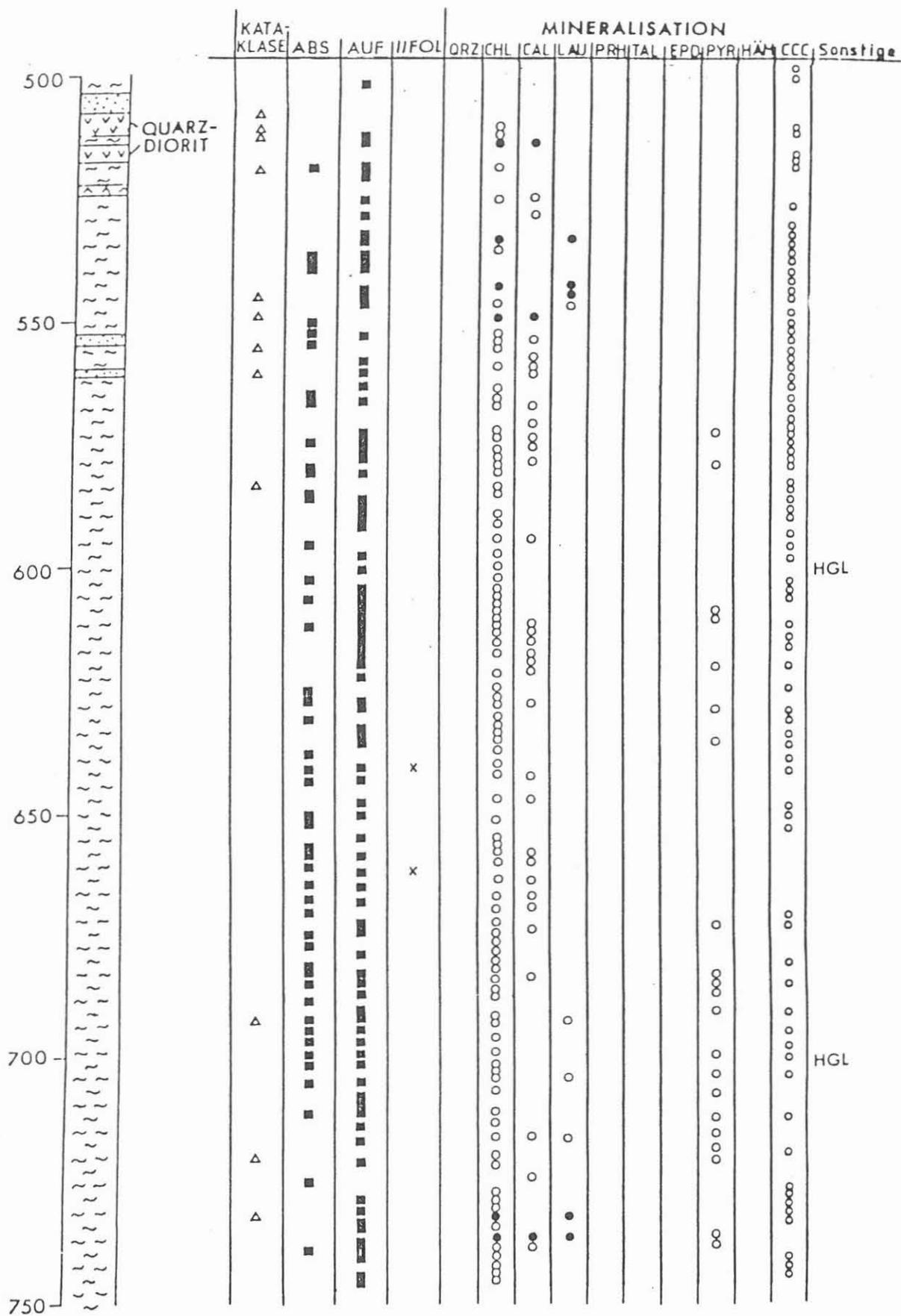
Wie aus Tab. E.2.1a-d zu entnehmen ist, existieren eine ganze Reihe von neugebildeten Mineralen auf den Harnischflächen.

Am auffälligsten ist hierbei Graphit (Abb. E.2.8), der im untersuchten Teufenbereich fast kontinuierlich nachzuweisen ist. Ähnlich verhalten sich Chlorit und Calcit. Chlorit kommt sehr ausgeprägt auf den in den Gneisen von 850 - 950 m foliationsparallel verlaufenden Verschiebungsflächen vor. Calcit als Harnischbelag fällt in dem obersten, amphibolitrei-

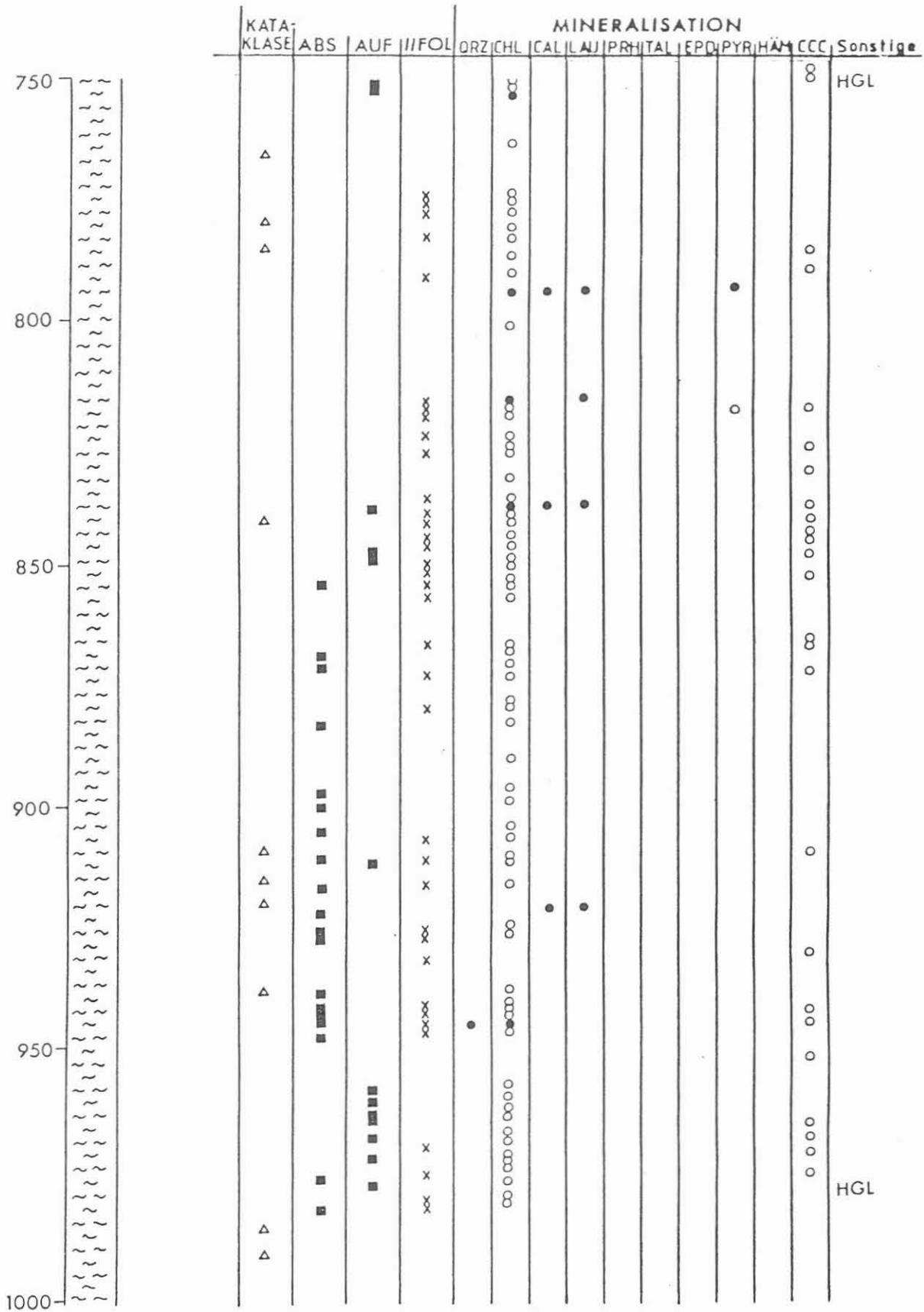


Tab. E.2.1.a

Tab. E.2.1.a-d: Teufenabhängiges Auftreten von Kataklasten, Abschiebungen (ABS), Aufschiebungen (AUF), foliationsparallelen Verschiebungsflächen (// FOL) und der Harnischmineralisation. Ausgefüllte Kreise = durch RDA nachgewiesene Minerale. Lithologisches Profil aus GRAUP et al. (1988). Abkürzungen der Minerale nach KTR-Report 88-1.



Tab. E.2.1.c



Tab. E.2.1.d

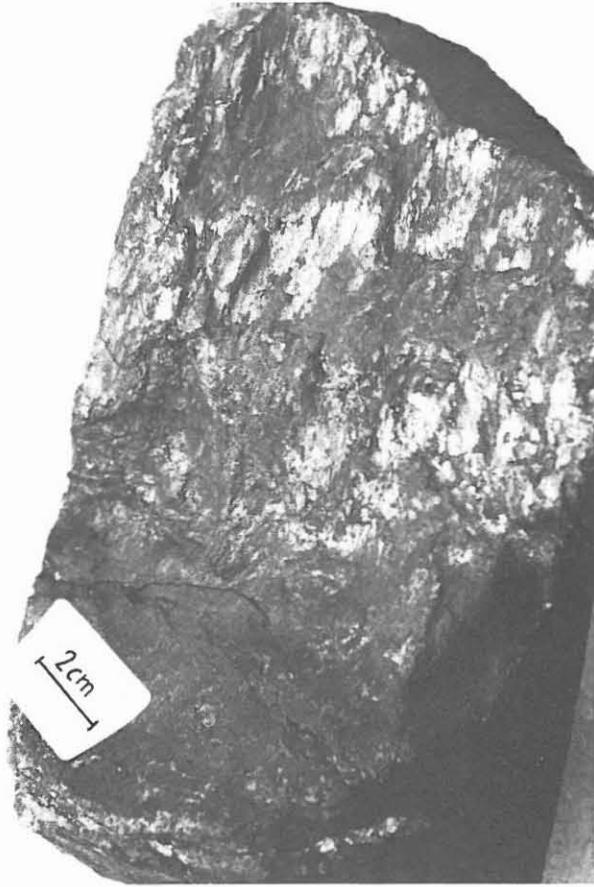


Abb. E.2.8: Graphitharnisch. Kernstück 27A2, ca. 200 m.

chen Abschnitt verstärkt durch das Auftreten von prägnanten Stufen auf. Diese Stufen eignen sich vorzüglich zur Bestimmung des Bewegungssinns (Abb. E.2.9).

Laumontit, der auf P-T-Bedingungen im very-low-Bereich hinweist, taucht zuerst bei ca. 240 m auf und läßt sich bis ca. 900 m röntgenographisch nachweisen. Zum Laumontit gesellt sich zwischen 300 und 400 m Prehnit.

Epidot läßt sich nur im obersten Teufenabschnitt, hier z.T. zusammen mit Hämatit auf Harnischoberflächen beobachten.

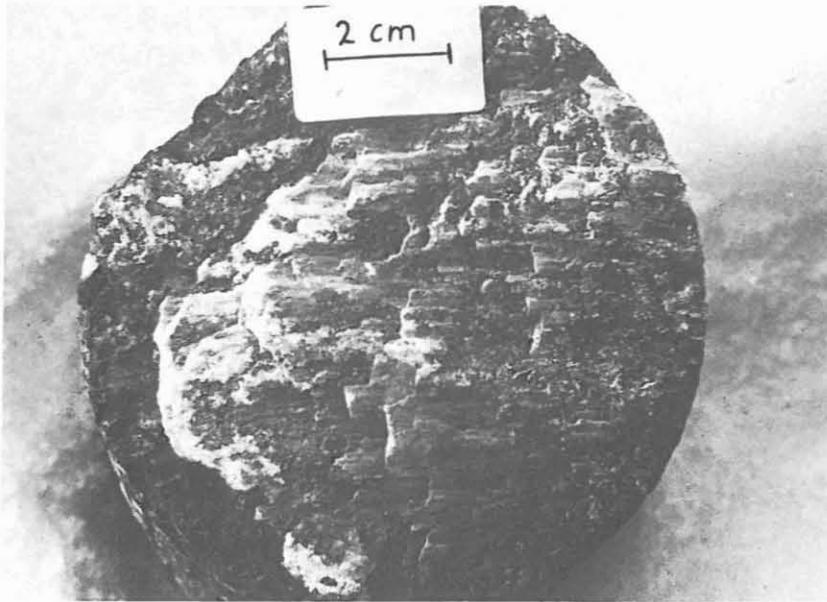


Abb. E.2.9: Calcitbelegte Harnischfläche. Die prägnanten Stufen lassen auf einen Bewegungssinn der Handgendscholle nach links schließen. Kernstück 27B1, ca. 200 m.

E.2.3. Altersabfolgen verschiedener Bruchsysteme

Auf eine Mehrphasigkeit der bruchtektonischen Vorgänge im untersuchten Teufenbereich deuten neben mehreren Harnischstriemungen mit unterschiedlicher Richtung - vor allem auf den graphitbelegten Verschiebungsflächen - folgende Beobachtungen hin. Es finden sich häufig ältere, mit einem weißen Mineral verfüllte Extensionsrisse, die durch jüngere, diskrete, mit einer grünen Mineralisation (Chlorit ?) belegten Scherbahnen versetzt werden. Bei ca. 420 m wird eine Aufschiebung durch eine Abschiebung versetzt. Auch ältere Katakklasezonen werden durch jüngere Störungen versetzt. Aus Abb. E.2.10 kann man z.B. entnehmen, daß eine relativ flach liegende Katakklasezone mit aufschiebendem Charakter durch eine relativ steile Aufschiebung entlang einer diskreten Bahn versetzt wird. Weiterhin fällt auf, daß die älteren Katakklase oft graphitreicher sind als die jüngeren (Abb. E.2.11).

Ein wichtiger, die Katakklase begleitender Deformationsmechanismus ist Drucklösung. Drucklösungssutturen treten bevorzugt entlang von Bewegungsbahnen (Abb. E.2.12) und im intakten Marmor bei ca. 130 m auf.

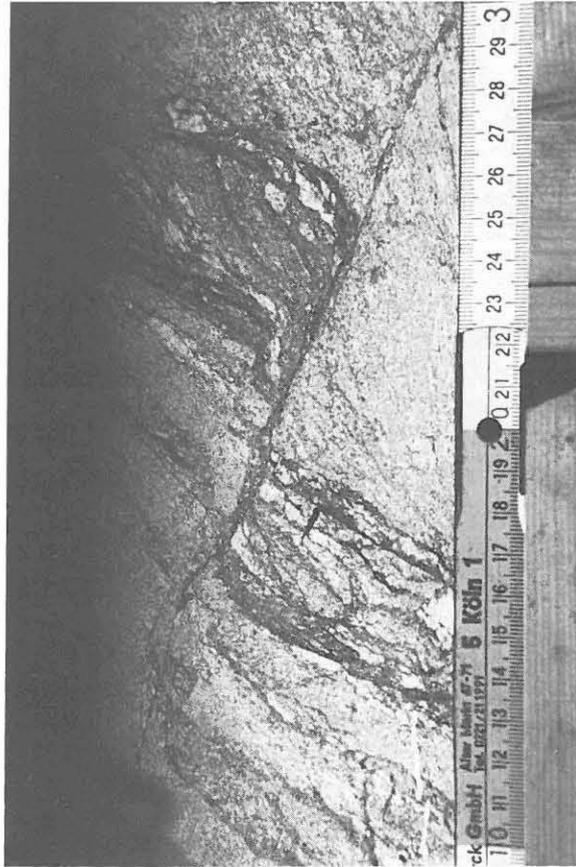


Abb. E.2.10: Eine relativ flache Kataklysezone mit aufschiebendem Charakter wird an einer diskreten Scherbahn in entgegengesetzter Richtung - ebenfalls aufschiebend - versetzt. Kernstück 248B2s, ca. 289 m.

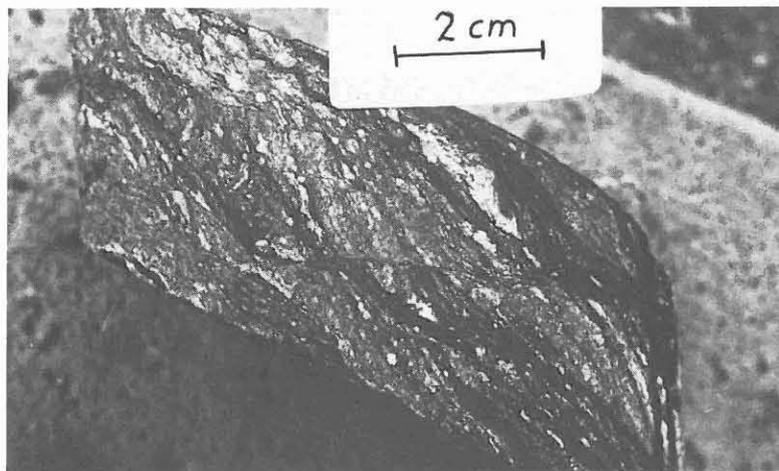


Abb. E.2.11: Ein graphitreicher Kataklysit wird entlang einer flachliegenden Verschiebungszone versetzt. Kernstück 98B3c, ca. 549 m.

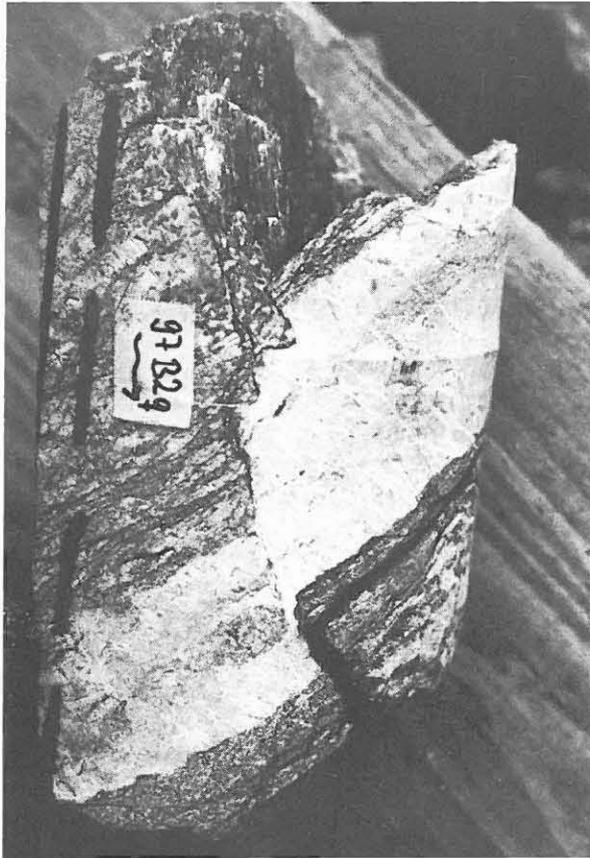


Abb. E.2.12: Drucklösungsstrukturen entlang einer Aufschiebung. Die in den versetzten Quarz-Feldspat-Gang hineinreichenden stylolithenartigen Zapfen verlaufen parallel zur Hauptnormalspannung. Man beachte die Stufen auf dem im oberen Bildteil sichtbaren Harnisch, die hier als kongruente Stufen ausgebildet sind und den aufschiebenden Charakter der Verschiebung bestätigen. Kernstück 97B2q, ca. 545 m. Länge des Etiketts = 2 cm.

E.3. Schlußfolgerung

Die Auswertungen der gemessenen Verschiebungsflächen lassen trotz fehlender Rückorientierung erste Trends hinsichtlich der Bewegungsmuster (Aufschiebungen, Abschiebungen etc.) erkennen. Es kann als sicher gelten, daß die Gesteine der Bohrung von mehreren bruchtektonischen Deformationen erfaßt worden sind. Hinweise hierfür liefern versetzte Kataklyse-

zonen und mehrere Harnischstriemungen auf den selben Flächen. Für detailliertere Aussagen, insbesondere über die genauen Altersabfolgen der einzelnen Bewegungsakte, müssen Dünnschliffauswertungen herangezogen werden.

Offensichtlich spielt die Lithologie eine gewisse Rolle für die Ausbildung der Bewegungsflächen. Dies läßt sich daran erkennen, daß in der bunten Wechselfolge von Gneisen und Amphiboliten bis ca. 530 m Aufschiebungen bei weitem überwiegen und mit dem Einsetzen der monotonen Paragneisserie ein Wechsel von Aufschiebungen zu Abschiebungen erfolgt.

Für die Rekonstruktion der Paläospannungsfelder ist die Rückorientierung der Bohrkerne unabdingbar. Liegen die Werte über die Rückorientierung (Azimutabweichung der am Bohrkern angebrachten Orientierungslinie, Bohrlochabweichung von der Vertikalen) vor, ist eine rechnerunterstützte Korrektur der von uns gemessenen Werte möglich (vgl. ADAM 1988), so daß anschließend eine - ebenfalls computergestützte - Paläospannungsanalyse erfolgen kann (vgl. ONCKEN 1988).

Weiterhin ist eine struktureologische Aufnahme des Umfeldes der Bohrung notwendig, um zusätzliche Raumdaten der Störungssysteme zu gewinnen, so daß diese mit den hier beschriebenen Beobachtungen und Auswertungen verglichen werden können.

Es ist vorgesehen, die Bohrkernaufnahme und -auswertung hinsichtlich der Verschiebungsflächen in der hier dargestellten Art und Weise für die folgenden Teufenabschnitte fortzusetzen.

Danksagung

Wir danken den Feldlabor-Mitarbeitern für die röntgendiffraktometrische Untersuchung der Harnischmineralisationen und die freundliche Überlassung von Messdaten des Teufenbereiches 556 bis 729 m.

E.4. Literaturverzeichnis

- ADAM, J.-F. (1988): Ein Rechnerprogramm zur Analyse von axialen Richtungsdaten. - 2. Symposium Tektonik-Struktur-geologie-Kristallingeologie im deutschsprachigen Raum. Kurzfassungen der Vorträge und Poster, 24.-26.3.1988; Erlangen.
- ENGELDER, J.T. (1974): Microscopic wear grooves on slickensides: indicators of paleoseismicity. - J. geophys. Res., 79: 4387-4392; Richmond.
- FLEUTY, M.J. (1975): Slickensides and slickenlines. - Geol. Mag., 112: 319-322;
- GAY, N.C. (1970): The formation of step structures on slickensided surfaces. - J. Geol., 78:523-532; Chicago.
- GRAUP, G., HACKER, W., KEYSSNER, S., MASSALSKY, T., MÜLLER, H., RÖHR, C. & UHLIG, S. (1988): KTB Oberpfalz VB - Erste Ergebnisse der geologischen Aufnahme bis 480 m. - KTB Report, 88-1: B1-B104; Hannover.
- HACKER, W., KEYSSNER, S., MASSALSKY, T., MÜLLER, H., RÖHR, C., UHLIG, S. & GRAUP, G. (1988): Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 480 bis 992 m. - KTB Report 88-2: B1-B60, 29 Abb.; Hannover.
- KRAUSE, H.-F., PILGER, A., REIMER, V. & SCHÖNFELD, M. (1978): Bruchhafte Verformung. Erscheinungsbild und Deutung mit Übungsaufgaben. - Clausthaler Tektonische Hefte, 16; Clausthal-Zellerfeld.
- MEANS, W.D. (1987): A newly recognized type of slickenside striation. - J. Struct. Geol., 9: 585-590; Oxford.
- NORRIS, D.K. & BARRON, K. (1968): Structural analysis of features on natural and artificial faults, Proceedings of Conference on Research in Tectonics. - Geol. Surv. Can. Paper, 68-52: 136-167; Ottawa.
- ONCKEN, O. (1988): Aspects of the reconstruction of the palaeo-stress-history of a fold- and thrustbelt. - Tectonophysics (im Druck).
- PATERSON, M.S. (1958): Experimental deformation and faulting in Wombeyan marble. - Geol. Soc. Amer. Bull., 69: 465-476; Boulder.
- PATERSON, M.S. (1978): Experimental rock deformation. - The brittle field. - 254 S.; Heidelberg (Springer).
- PETIT, J.P. (1987): Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. - J. Struct. Geol., 9: 597-608; Oxford.
- TJIA, H.D. (1964): Slickensides and fault movements. - Geol. Soc. Amer. Bull., 75: 683-686; Boulder.
- RAMSAY, J.G. & HUBER, M.I. (1987): The techniques of modern structural geology. Volume 2: Folds and Fractures. - 700 S.; London (Academic Press).
- WINKLER, H.G.F. (1979): Petrogenesis of Metamorphic Rocks. - VII + 348 S.; Berlin - Heidelberg - New York (Springer).