

Akademie der Wissenschaften der DDR
Forschungsbereich Geo- und Kosmoswissenschaften
Zentralinstitut für Physik der Erde

Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde
Nr. 39

Die nachträgliche Orientierung von Bohrkernen
unter besonderer Berücksichtigung des Paläomagnetismus

von
Manfred Menning

Als Manuskript gedruckt
Potsdam 1976

III-12-12 A 3232/76

Inhaltsverzeichnis

| | <u>Seite</u> |
|------------------------------------------------------------------|--------------|
| Häufig verwendete Abkürzungen und Symbole | 5 |
| Zusammenfassung | 6 |
| Vorwort | 7 |
| 1. Einführung | 8 |
| 1.1. Problemstellung | 8 |
| 1.2. Die Verfahren zur Orientierung von Bohrkernen | 8 |
| 1.3. Lösungsweg | 10 |
| 2. Die paläomagnetische Bohrkernorientierung | 11 |
| 2.1. Theoretische Grundlagen | 11 |
| 2.1.1. Bezugssystem der Orientierung und Schichtproblem | 11 |
| 2.1.2. Die natürliche remanente Magnetisierung (NRM) | 12 |
| 2.1.3. Die Ablagerungsmagnetisierung (DRM) | 13 |
| 2.1.4. Die Dipolhypothese | 14 |
| 2.1.5. Das paläomagnetische Orientierungsprinzip | 15 |
| 2.1.6. Die charakteristische Remanenz (CARM) und ihre Stabilität | 16 |
| 2.2. Literaturübersicht | 17 |
| 2.2.1. Magnetische Bohrkernorientierung | 17 |
| 2.2.2. Paläomagnetische Bohrkernorientierung | 18 |
| 2.3. Das Paläokoordinatensystem im Untersuchungsgebiet | 19 |
| 2.3.1. Mittlere paläozoische Polpositionen für Europa | 19 |
| 2.3.2. Paläobreite und Paläomeridian | 21 |
| 2.4. Probenbearbeitung | 23 |
| 2.4.1. Probennahme und -aufbereitung | 23 |
| 2.4.2. Messung der Remanenz und "magnetische Säuberung" | 24 |
| 2.5. Auswertung der Messungen | 25 |
| 2.5.1. Formelwerk | 25 |
| 2.5.2. Nordorientierung des Bohrkerns | 27 |
| 2.5.3. Neigungskorrektur | 29 |
| 2.6. Ergebnisse | 30 |
| 2.6.1. Remanenz der Bohrkernkerne | 30 |
| 2.6.1.1. Isolierung der charakteristischen Remanenz | 30 |
| 2.6.1.2. Abhängigkeit vom Gestein | 33 |
| 2.6.1.3. Polarität | 33 |
| 2.6.1.4. Magnetisch wirksame Minerale | 36 |
| 2.6.2. Einflüsse auf die Remanenz der Bohrkernkerne | 37 |
| 2.6.2.1. Posttektonische Remagnetisierung | 37 |
| 2.6.2.2. Bohrprozeß, Erdfeld, Versenkungstiefe | 38 |
| 2.6.2.3. Säkularvariation | 41 |
| 2.6.2.4. Feldinversion | 42 |
| 2.6.2.5. Probenbearbeitung | 43 |
| 2.6.3. Geometrische Einflüsse auf die Kernorientierung | 44 |
| 2.6.3.1. Bohrlochabweichung (BA) | 44 |
| 2.6.3.2. Kopf-Krone-Vertauschung | 49 |

| | <u>Seite</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 2.6.4. Betrachtung zu Randproblemen | 50 |
| 2.6.4.1. Zur Möglichkeit der Kopf-Krone-Orientierung mit Hilfe der natürlichen remanenten Magnetisierung | 50 |
| 2.6.4.2. Zur Möglichkeit einer paläomagnetischen Stratigraphie in Bohrungen | 51 |
| 2.6.4.3. Zur Isolierung der Ablagerungsmagnetisierung in roten Sedimentiten | 53 |
| 2.6.4.4. Auswertung der Paläopolpositionen hinsichtlich ihrer regionaltektonischen Aussage | 54 |
| 2.7. Optimierung des Verfahrens | 55 |
| 2.8. Eignung und Genauigkeit des Verfahrens | 57 |
| | |
| 3. Weitere Verfahren zur nachträglichen Orientierung von Bohrkernen | 59 |
| 3.1. Orientierung nach der Schichtneigungsmessung | 59 |
| 3.1.1. Orientierungsprinzip | 59 |
| 3.1.2. Voraussetzungen und Einflüsse | 59 |
| 3.1.3. Einschätzung der Aussagekraft | 61 |
| 3.2. Orientierung nach der Bohrlochabweichung | 62 |
| 3.2.1. Orientierungsprinzip | 62 |
| 3.2.2. Voraussetzungen und Einflüsse | 63 |
| 3.2.3. Einschätzung der Aussagekraft | 64 |
| 3.3. Orientierung mit Hilfe der Reflexionsseismik | 66 |
| 3.3.1. Orientierungsprinzip | 66 |
| 3.3.2. Voraussetzungen und Einflüsse | 67 |
| 3.3.3. Einschätzung der Aussagekraft | 68 |
| 3.4. Orientierung nach Isobathenkarten und charakteristischen Horizonten | 68 |
| 3.4.1. Orientierungsprinzip | 68 |
| 3.4.2. Einschätzung der Aussagekraft | 69 |
| 3.5. Orientierung mit Hilfe des Schnitteffekts am Bohrkern | 71 |
| 3.5.1. Orientierungsprinzip | 71 |
| 3.5.2. Einschätzung der Aussagekraft | 71 |
| | |
| 4. Vergleich der Ergebnisse der Orientierungsverfahren | 73 |
| 4.1. Ermittlung des mittleren Streichens und Fallens | 73 |
| 4.2. Beispiele aus Bohrungen | 74 |
| 4.2.1. Bohrung XI | 74 |
| 4.2.2. Bohrung V | 76 |
| 4.2.3. Bohrung VIII | 78 |
| 4.3. Empfehlungen zur Raumlagebestimmung des Präzechsteins im Bereich einer Bohrung | 80 |
| 4.4. Ökonomischer Aufwand der Orientierungsverfahren | 83 |
| | |
| 5. Zusammenfassung der Ergebnisse | 85 |
| | |
| Literatur | 88 |
| Verzeichnis der Tabellen und Anlagen | 95 |
| Anlagen | |

Häufig verwendete Abkürzungen und Symbole

| | |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| α | 90° minus Schichteinfallen am Kern |
| α_{95} | Halbachse des Vertrauenskreises (confidence level) |
| BA | Bohrlochabweichung |
| CARM | charakteristische remanente Magnetisierung |
| CRM | chemoremanente Magnetisierung |
| D | Deklination in einem Würfel |
| Dm | Deklination in einer Probe |
| Dm' | Deklination einer Kopf-Krone-orientierten Probe |
| $\Delta\lambda$ | maximale Abweichung EL - sEL |
| δ_m } δ_p } | Halbachsen der Konfidenzellipse |
| DRM | depositional remanent magnetization |
| EL | Einfalllineare im Anstehenden |
| I | Inklination in einem Würfel |
| Im | Inklination in einer Probe |
| IRM | isothermale remanente Magnetisierung |
| J/J ₀ | Intensität der NRM in Prozenten zur initialen Messung |
| J _x } J _y } J _z } | Komponenten der NRM in einem Probenwürfel |
| J' _x } J' _z } | neigungskorrigierte J _x - und J _z -Komponenten |
| k | Präzisionsparameter |
| λ_p | Paläobreite |
| NRM | natürliche remanente Magnetisierung |
| Oe | Oersted |
| p | Poldistanz |
| ϕ | Einfallen im Anstehenden |
| ϕ' | Einfallen einer Lineare |
| ϕ'' | Einfallen am Kern |
| PRM | piezoremanente Magnetisierung |
| PTRM | partielle thermoremanente Magnetisierung |
| sEL | scheinbare Einfalllineare am Kern |
| TRM | thermoremanente Magnetisierung |
| UCARM | uncharakteristische remanente Magnetisierung |
| VGP | axialer geozentrischer Dipol (virtual geomagnetic pole) |
| VRM | viskose remanente Magnetisierung |

Zusammenfassung

Bohrkerne sind nachträglich zu orientieren mit Hilfe der Schichtneigungsmessung (Stratolog), der Bohrlochabweichung, der Reflexionsseismik, mittels des Schnitteffekts am Bohrkern sowie besonders erfolgreich paläomagnetisch. Bohrkerne werden paläomagnetisch orientiert, indem man die Vektorkomponente der charakteristischen Remanenz im Bohrkern bestimmt, die bei der Genese der charakteristischen Remanenz in der Horizontalen lag. Diese Vektorkomponente wird in Richtung des anhand von Literaturangaben berechneten Paläomeridians ausgerichtet. Trotz der Feldinversionen, der Säkularvariation, viskoser Remanenzen (VRM) und der Bohrlochabweichung können in permischen, karbonischen und devonischen Sedimentiten der Mitteleuropäischen Senke Streichen und Fallen sowie Schüttungsrichtungen bestimmt oder Klüfte mit einem mittleren Fehler von $\pm 10^\circ$ bis $\pm 20^\circ$ orientiert werden.

Summary

Drillcores must subsequently be orientated by means of dip logging (stratolog), deviation of well, seismic reflection method, the effect of cross-bearing of the core, and, with particular success, by palaeomagnetic method. Cores are given a palaeomagnetic orientation by determining the vectorial component of the characteristic remanent magnetization in them, which lay in the horizontal plane during the genesis of the characteristic remanent magnetization. This vectorial component is aligned in the direction of the palaeomeridian calculated from literature references. In spite of the reversions, secular variation, viscous remanent magnetizations (VRM) and deviation of well, strike and dip as well as directions of accretion can be determined, or joints be oriented, with a mean error of ± 10 to $\pm 20^\circ$ in Permian, Carboniferous and Devonian sedimentites of the Central European depression.

Résumé

Il faut orienter ultérieurement les carottes moyennant la mesure de l'inclinaison de couche (stratolog), la déviation du sondage, la sismique par réflexion, l'effet de coupe de la carotte et, de manière particulièrement fructueuse, le paléomagnétisme. On oriente les carottes par le dernier, en y déterminant la composante vectorielle de l'aimantation rémanente caractéristique qui se trouvait, au cours de la genèse de cette aimantation, dans le plan horizontal. La composante vectorielle est alignée dans la direction du paléomérien calculé suivant les références signalées dans la littérature. Malgré les inversions de champ, la variation séculaire, les aimantations rémanentes visqueuses et la déviation du sondage, il est possible de déterminer la direction et le pendage ainsi que les directions d'exhaussement, ou d'orienter les diaclases, d'une erreur moyenne de $\pm 10^\circ$ à $\pm 20^\circ$, dans les roches sédimentaires permienues, carbonifères et dévoniennes de la dépression de l'Europe centrale.

Резюме

Буровые керны должны ориентироваться дополнительно с помощью пластового измерения (страталог), искривления скважины, сейсмике отраженных волн, с помощью эффекта сечения у бурового керна и также особенно успешно палеомагнитными методами. Палеомагнитным методом буровые керны ориентируются определены векторной компоненты характеристической остаточной намагниченности в буровой керне, которая лежала в горизонте при возникновении характеристической остаточной намагниченности. Эта векторная компонента направляется в направление палеомеридиана, который определяется по данным из литературы. Несмотря на инверсии поля, вековые вариации, вязкую остаточную намагниченность (VRM) и искривление скважины можно в пермских, каменноугольных и девонских отложениях Среднеевропейской впадины определить простирание, падение и также направление напыла и ориентировать трещины со средней ошибкой от $\pm 10^\circ$ до $\pm 20^\circ$.

Vorwort

Die vorliegende Veröffentlichung ist die leicht veränderte Dissertation, die am 10.7.1974 an der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald eingereicht wurde, nachdem sie dort begonnen und im Zentralinstitut für Physik der Erde abgeschlossen worden war.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. sc. G. MÖBUS, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, für die Auswahl des Themas und die stetige Förderung der Arbeit.

Dem Zentralen Geologischen Institut Berlin bin ich für die Überlassung des Bohrkernmaterials, dem VEB Geophysik Leipzig für die Bereitstellung der geophysikalischen Daten und dem Potsdamer Zentralinstitut für Physik der Erde der Akademie der Wissenschaften der DDR für die Möglichkeit zur Benutzung des Rockgenerators und der Entmagnetisierungsanlage zu Dank verpflichtet.

Allen Kollegen und Mitarbeitern, die mich bei der Anfertigung der Arbeit unterstützten, danke ich für die geleistete Hilfe herzlich.

1. Einführung

1.1. Problemstellung

Bei der Suche nach Kohlenwasserstoff-Lagerstätten werden zunehmend tiefere Bereiche großer Sedimentbecken durch Bohrungen erschlossen. Im Gebiet der Nordostdeutschen Senke, einem Teilgebiet der Mitteleuropäischen Senke, erreichten zahlreiche Bohrungen Schichten des Präzechsteins (GLUŠKO u.a. 1974). Trotzdem ist über die speziellen Verhältnisse dieser vorwiegend sedimentären Abfolgen derzeit noch wenig bekannt, da der in der Regel sicher zu erfassende Reflexionshorizont Z an der Oberfläche des Basalanhydrits im Zechstein 2 liegt.

Die Vorstellungen über die Lagerungsverhältnisse in den zentralen Teilen tiefer Sedimentbecken werden vor allem durch eine komplexe Interpretation geophysikalischer Messungen gewonnen. Die im allgemeinen kleine Zahl der Tiefbohraufschlüsse, die dort das Paläozoikum erreichten, zeigten, daß die geophysikalische Vorerkundung die wahren strukturellen Verhältnisse nur in groben Zügen widerzuspiegeln vermag. Aus diesem Grunde bestand die Aufgabe, eine Methode zur nachträglichen Orientierung von Bohrkernen zu entwickeln, mit deren Hilfe bisher nicht zu erhaltende Informationen über die Raumlage der Schichtung im Unterbau tiefer Sedimentbecken gewonnen werden können.

Neben der Klärung des strukturellen Baus eines Gebietes sind orientierte Bohrkernkerne weiterhin von Bedeutung für

- die Nordorientierung von kleintektonischen Daten, die an unorientierten Bohrkernen gewonnen wurden,
- die Klärung der speziellen Verhältnisse einer Lagerstätte,
- die Bestimmung von Schüttungsrichtungen sedimentärer Primärgefüge,
- die Orientierung von Korngefügeanalysen.

1.2. Die Verfahren zur Orientierung von Bohrkernen

Die Verfahren zur Bohrkernorientierung kann man nach zwei Prinzipien gliedern: erstens in Beziehung zum Ort der Orientierung (Tab. 1) und zweitens in Beziehung zum Bohrkern (Tab. 2).

Ich habe die erste Gliederungsmöglichkeit verwendet. Dementsprechend kann die Orientierung von Bohrkernen direkt im Bohrloch (primäre oder direkte Orientierung) oder auf nachträglichem Wege (sekundäre oder nachträgliche Orientierung) erfolgen.

Für die direkte Orientierung im Bohrloch beschreiben REICH (1941), VLASSENKO (1956), LORBACH (1964) und BENTZ & MARTINI (1968) mehrere Verfahren. Ein Orientierungsprinzip besteht in der Arretierung einer fest mit dem noch unabgebrochenen Kern verbundenen Kompaßnadel, nachdem diese zuvor nach magnetisch Nord eingependelt war. Bei einem zweiten Prinzip wird nach dem Glätten

der Bohrlochsohle in diese eine Markierung gekerbt, deren Lage in bezug zu einer Kompaßnadel oder einem Lotschatten, den das Pendel eines Inklinometers verursacht, photographisch festgehalten wird. Anschließend kernt und zieht man den Kern und orientiert ihn über Tage. VAQUIER [in REICH (1941)] schlägt vor, in situ in den Bohrkern einen Hohlraum zu bohren, in den eine Flüssigkeit mit magnetischen Mineralen geleitet wird. Die magnetischen Teilchen richten sich in der kurzfristig erstarrenden Flüssigkeit entsprechend dem rezenten Magnetfeld aus, und der Kern kann über Tage orientiert werden. - Bei Salzbohrungen bildet sich infolge der Unterschichtung der Ölspülung mit Wasser eine Lösungszone am noch unabgerissenen Bohrkern. Der Bohrkern wird über Tage in Bohrlochabtauchrichtung ausgerichtet und so lange um seine Achse gedreht, bis die Grenze der Lösungszone horizontal liegt. Nach dieser Prozedur ist der Kern wie im Anstehenden orientiert. - Das Ziehen orientierter Kerne verursacht eine Unterbrechung des Bohrprozesses und oft auch einen zusätzlichen

Tab. 1. Gliederung der Orientierungsverfahren in Beziehung zum Ort der Orientierung

| | | |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Direkte (primäre) Kernorientierung <u>im Bohrloch</u> | 0. Markierung des Kerns im Bohrloch | |
| Nachträgliche (sekundäre) Kernorientierung <u>außerhalb des Bohrloches</u> | nachträglich indirekt | 1. Schichtneigungsmessung 2. Bohrlochabweichung 3. Reflexionsseismik 4. Isobathenkarten und charakteristische Horizonte 5. Schnitteffekt am Bohrkern |
| | nachträglich direkt | 6. Paläomagnetismus |

Tab. 2. Gliederung der Orientierungsverfahren in Beziehung zum Bohrkern

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Direkte Kernorientierung <u>Orientierung des einzelnen Kerns</u> | 1. Markierung im Bohrloch 2. Paläomagnetismus |
| Indirekte Kernorientierung <u>Bestimmung des mittleren Streichens und Fallens im Anstehenden</u> | 3. Schichtneigungsmessung 4. Bohrlochabweichung 5. Reflexionsseismik 6. Isobathenkarten und charakteristische Horizonte 7. Schnitteffekt am Bohrkern |

Aus- und Einbau des Gestänges, Arbeiten, die das Verfahren kostspielig machen. Unge-
naue oder falsche Ergebnisse erhält man, wenn der Kern schon vor der Orientierung ab-
reißt oder zerbricht.

Die n a c h t r ä g l i c h e O r i e n t i e r u n g von Bohrkernen aus
klastischen Sedimentiten, auf die sich diese Arbeit ausschließlich bezieht, läßt
sich auf zwei Wegen realisieren. Entweder wird der Bohrkern anhand der in ihm über-
lieferten geologisch-geophysikalischen Information orientiert (nachträglich-direktes
Verfahren - paläomagnetische Kernorientierung), oder man ermittelt Schichtstreichen
und -einfallen im Anstehenden und richtet die Schichtflächen der Bohrkernkerne ent-
sprechend diesen Angaben aus (nachträglich-indirektes Verfahren - Orientierung mit Hil-
fe der Schichtneigungsmessung, der Bohrlochabweichung, der Reflexionsseismik, von
Isobathenkarten und charakteristischen Horizonten sowie des Schnitteffekts am Bohr-
kern).

1.3. Lösungsweg

In dieser Arbeit werden die Möglichkeiten zur nachträglichen Kernorientierung
anhand von paläozoischen, vor allem karbonischen Sedimentkernen aus 11 Tiefbohrun-
gen der Norddeutsch-Polnischen Senke analysiert. Als Bezugselement für die Kern-
orientierungsverfahren wurde die Linie des größten Einfallens auf der Schichtfläche
(Schichteinfalllineare) ausgewählt, da die Schichtflächen im Bohrkern in vielen se-
dimentären Gesteinen genau zu fixieren sind.

Die hier entwickelte Methode besteht darin, daß man Streichen und Fallen im Be-
reich einer Bohrung mit all jenen Verfahren zur nachträglichen Bohrkernorientierung
ermittelt, die unter den gegebenen lokalen geologischen und geophysikalischen Ver-
hältnissen Aussicht auf Erfolg haben. Aus den Ergebnissen der einzelnen Orientie-
rungsverfahren wird dann die mittlere Raumlage der Schichtung bestimmt. Diese Metho-
de hat den Vorteil, daß

- die Raumlage der Schichtung, die aus mehreren, unabhängig voneinander gewonne-
nen Ergebnissen ermittelt wird, sicherer ist als diejenige, die nur ein Orien-
tierungsverfahren zugrunde liegt;
- mit Hilfe des Ergebnisvergleichs der Orientierungsverfahren an mehreren Objek-
ten die Aussagesicherheit der Verfahren besser eingeschätzt werden kann als mit
einer noch so guten Fehlerrechnung für nur ein Verfahren;
- es möglich ist, systematisch oder zufällig abweichende Ergebnisse eines Ver-
fahrens zu erkennen und deren Ursache aufzudecken.

Speziell wird in dieser Arbeit die paläomagnetische Bohrkernorientierung unter-
sucht, da sie viele wesentliche Vorteile gegenüber den anderen Verfahren zur nach-
träglichen Orientierung von Bohrkernen hat. Zu diesem Zweck wurden erstmals paläo-
magnetische Untersuchungen im tief versenkten Paläozoikum der Norddeutsch-Polnischen
Senke durchgeführt. Um die Vertrauenswürdigkeit des paläomagnetischen Verfahrens
für die Raumlagebestimmung der Schichtung zu prüfen, wurde ein Vergleich mit ge-
sicherten Ergebnissen der anderen Verfahren zur nachträglichen Bohrkernorientierung
vorgenommen.

2. Die paläomagnetische Bohrkernorientierung

2.1. Theoretische Grundlagen

2.1.1. Bezugssystem der Orientierung und Schichtproblem

Als Bezugssystem der Orientierung wurde die Schichteinfalllineare am Bohrkern ausgewählt. Sie ist die Linie des größten Fallens am senkrecht stehenden Kern, die paläomagnetisch orientiert wird (Abb. 1). Zeigt der Kern keine Schichtung oder hat diese nur ein kleines oder kein Einfallen, so paßt man die Kerne anhand ihrer Bruchflächen aneinander. Die zusammengepaßte Kernstrecke wird mit einer geraden Linie versehen, die als Bezugssystem der Messung dient und paläomagnetisch orientiert wird. In Beziehung zu dieser Linie können Klüfte und andere kleintektonische Elemente eingemessen und mit Hilfe der Bohrkernorientierung im heutigen geographischen Koordinatensystem orientiert werden.

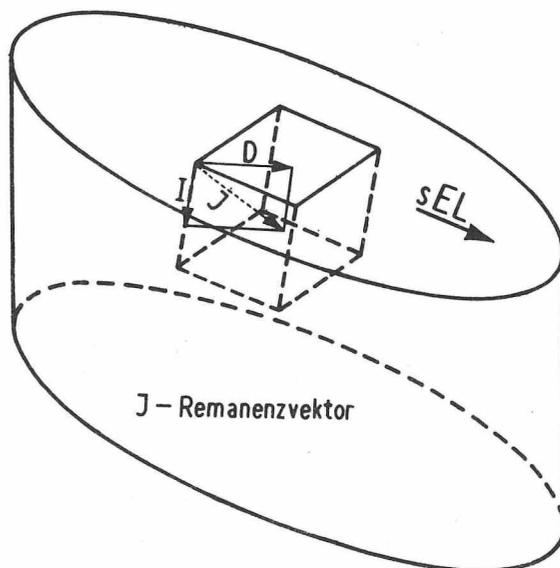


Abb. 1

Bohrkern mit Probenwürfel und Magnetisierungsvektor

Eine einheitliche Schichteinfallrichtung kann man mit Hilfe der paläomagnetischen Bohrkernorientierung nur ermitteln, wenn diese in situ auch deutlich ausgeprägt ist. In Schrägschichtungsbereichen ist das nicht möglich, weil die Einfalllinearen der Schrägschichtungsblätter stark streuen. Daran ändert auch die Tatsache nichts, daß nach WURSTER (1958) die Schrägschichtung im allgemeinen in Strömungsrichtung einfällt. POTTER & PETTIJOHN (1963) ermittelten für die Richtungsvarianz in Schrägschichtungsbereichen eine Standardabweichung von $63 - 78^\circ$ für fluviatile Deltaablagerungen und $78 - 89^\circ$ für marine Ablagerungen. Einfallrichtung und -betrag der Schrägschichtungsblätter stimmen deshalb mit der großräumigen Schichteinfallrichtung oft nicht überein und täuschen zuweilen sogar ein nicht vorhandenes Einfallen vor. Bei der Beprobung muß deshalb zuallererst Wert auf die Nichtbeprobung aus Schrägschichtungsbereichen gelegt werden, wenn man die wahre Einfallrichtung bestimmen will. Schrägschichtungsgebiete mit einer postsedimentären Remanenz sind jedoch nach Zusammenpassen der Kerne und deren Kennzeichnung mit einer geraden Linie ohne Ausnahme

orientierbar. Man kann dann z.B. die mittlere Einfallrichtung der Schrägschichtungsblätter ermitteln und damit die Paläoschüttungsrichtung feststellen. Die Variation der Einfallrichtungen der Schrägschichtungsblätter ist im Normalfall um so geringer, je stärker der Schichtkomplex sekundär gekippt wurde. Überwiegt die sekundär entstandene Neigung der Schrägschichtungsblätter die primäre erheblich, so ist die großräumige Einfallrichtung des Schichtkomplexes bei ausreichender Probenzahl relativ genau zu ermitteln.

Schrägschichtungsbereiche sind am Bohrkern oft schwer zu erkennen, vor allem dann, wenn die Serienhöhe der Schrägschichtungsblätter größer als die Länge des Kernmarsches ist. In vielen Fällen sind jedoch Schrägschichtungsbereiche anhand des Sedimentgefüges oder des stark schwankenden Schichteinfallens am Bohrkern auszuhalten. Weiterhin kann man anhand der Variation der Einfallrichtungen auf mehreren benachbarten Schichtflächen eines Bohrkerns die Frage "Schrägschichtung oder Parallelschichtung" oft sicher beantworten.

Neben einem sinnvollen Bezugssystem für die Orientierung und der richtigen Auswahl der Proben ist eine geeignete remanente Magnetisierung die entscheidende Grundlage für den Erfolg der Bohrkernorientierung.

2.1.2. Die natürliche remanente Magnetisierung (NRM)

Gesteine, die antiferromagnetische oder ferrimagnetische Minerale enthalten, erwerben bei ihrer Genese eine Magnetisierung, deren Richtung parallel zum wirkenden Erdfeld verläuft. Ein Teil dieser Magnetisierung, die als Remanenz oder remanente Magnetisierung (J_r) oder natürliche remanente Magnetisierung (NRM) bezeichnet wird, kann seine Richtung über Jahrtausende beibehalten und bei paläomagnetischen Untersuchungen gemessen und interpretiert werden.

Die NRM eines Gesteins kann sich aus mehreren Komponenten zusammensetzen, die sich vektoriell addieren und deren wichtigste hier erläutert seien:

- Eine Ablagerungsmagnetisierung - DRM (depositional oder detrital remanent magnetization) bildet sich infolge Einregelung ferri- oder antiferromagnetischer Partikeln während des Sedimentationsprozesses sowie durch Orientierung der Teilchen im wassergesättigten Lockersediment.
- Eine chemoremanente Magnetisierung ((CRM) entsteht syn- oder postsedimentär durch physiko-chemische Prozesse im Gestein (z.B. Oxydation).
- Eine isothermale remanente Magnetisierung (IRM), die oft auch als viskose remanente Magnetisierung (VRM) bezeichnet wird, bildet sich bei Normaltemperatur. Sie ist in allen Gesteinen vorhanden, sehr schwach, erdfeldparallel und mittels Entmagnetisierung leicht zu zerstören.
- Eine thermoremanente Magnetisierung (TRM) erhält man bei Erhitzen eines Gesteins über den CURIE-Punkt der ferromagnetischen (im weiteren Sinne) Mineralien und seiner nachfolgenden Abkühlung unter denselben.

- Eine partielle thermoremanente Magnetisierung (PTRM) entsteht, wenn sich ein ferri- bzw. antiferromagnetisches Mineral von Temperaturen unter der CURIE-Temperatur in einem schwachen magnetischen Feld abkühlt.
- Eine piezoremanente Magnetisierung (PRM) entsteht durch einaxialen Druck.

Bei Richtungs- und Intensitätsänderungen des Magnetfeldes der Erde bleibt ein Teil der Remanenz, die charakteristische Remanenz (DRM, CRM, TRM), im Gestein erhalten, da das Erdfeld mit seiner relativ kleinen Feldstärke von ca. 0,5 Oe (JANOVSKY 1961) auch bei langer Wirkungsdauer die charakteristische Remanenz (ANGENHEISTER & SOFFEL 1972) nicht wesentlich beeinflussen kann. Das Erdmagnetfeld war während des Phanerozoikums zu keinem Zeitpunkt stark genug, um eine deutlich ausgeprägte charakteristische Remanenz im Gestein zu zerstören oder wesentlich umzuorientieren. Deshalb kann man mit Hilfe der gegenüber Entmagnetisierungseinflüssen weitgehend stabilen Remanenzen DRM und CRM Bohrkerne paläomagnetisch orientieren.

2.1.3. Die Ablagerungsmagnetisierung (DRM)

Eine DRM (depositional oder detrital remanent magnetization) bildet sich beim Absatz feinklastischer und mergeliger Sedimente, wobei die Achse der stärksten Magnetisierung in den Körnern infolge der Wirkung des Magnetfeldes der Erde entsprechend dessen Richtung orientiert wird. Nach PORATH (1971) sowie FRÖLICH, STILLER & VOLLSTÄDT (1965) resultiert die magnetische Anisotropie einer Partikel aus seiner Form (Formanisotropie) und den magnetischen Eigenschaften in bezug auf die kristallographischen Achsen (Kristallanisotropie). Titanomagnetite zeigen nur Formanisotropie, d.h., die lange Achse des Mineralkorns ist die Richtung der größten Suszeptibilität und umgekehrt (PORATH 1971). Hämatit dagegen besitzt nur eine geringe Formanisotropie, aber eine große Kristallanisotropie.

Nach NOZHAROV (1966) hängt der Grad der erdfeldparallelen Orientierung der Partikeln ab von

- der Intensität des Erdfeldes,
- der Größe des magnetischen Moments der Partikeln, ihrer Form und Größe,
- dem Charakter der Sedimentationsfläche sowie
- der Tiefe und dem hydrodynamischen Regime des Wasserbeckens.

Die Strömung verursacht ein Rotationsmoment, das mit der Strömungsgeschwindigkeit sowie der Formanisotropie und der Größe der Partikeln wächst. Das Rotationsmoment der magnetischen Kräfte steigt mit der Intensität des Erdfeldes und der Größe des magnetischen Moments der Partikeln. Wenn das durch die Strömung verursachte Rotationsmoment kleiner ist als das der magnetischen Kräfte, werden die Partikeln erdfeldparallel ausgerichtet (NOZHAROV 1968). Voraussetzung dafür ist, daß die Partikeln genügend Zeit haben, sich entsprechend zu orientieren.

Sandkomponenten werden vor allem als Bodenfracht transportiert. Sie haben zwar eine bessere Rundung als Ton- und Siltsteinpartikeln, die beim Transport in Suspension sind (FÜCHTBAUER & MÜLLER 1970), aber keine oder nur eine geringe Absinkzeit.

Gegen die Verwendung von Sandsteinen mit einer DRM für die paläomagnetische Bohrkernorientierung sprechen das kleine magnetische Moment der Körner, die Strömungsgeschwindigkeit bei der Sedimentation, das große Volumen der Körner und die geringe Absinkzeit. Ton- und Siltsteine sind wegen der geringen Wasserturbulenz beim Absinken der Komponenten, der relativ langen Absinkzeit, der Kleinheit der Partikeln und im Hinblick auf deren verhältnismäßig große magnetische Momente zur Bohrkernorientierung gut geeignet.

Nach Versuchen von REES (1961/64) und HAMILTON (1967) [zitiert in PORATH (1971)] hat das erdmagnetische Feld als Richtungskraft nur für Korngrößen bis 10 μm Bedeutung. Nach VLASOV (1961) [in TRETJAK (1965)] werden Teilchen bei einer Größe von 1 μm vollständig ausgerichtet, während bei 3 μm bereits eine Abweichung von $\pm 8^\circ$ auftritt. Da sich in den meisten Fällen die längste Achse der Körner parallel zur Strömung orientiert (FÜCHTBAUER & MÜLLER 1970), spiegelt die schichtflächenparallele Remanenzrichtung in grobklastischen Sedimenten nicht die Erdfeld-, sondern die Strömungsrichtung wider (TRETJAK 1965; VLASOV & KOVALENKO 1965).

Die Inklination künstlicher Sedimente mit länglichen Körnern ist kleiner als die des wirkenden Magnetfeldes, da die Gravitationskraft versucht, die Längsachsen der Partikeln in die Sedimentationsebene zu legen. Aus diesem Grunde entsteht ein Inklinationsfehler, dessen Größe nach ANGENHEISTER (1957) von der Inklination des Magnetfeldes und damit von der geographischen Breite abhängt. Der Inklinationsfehler kann nach TROPIN & KOVALENKO (1966) 20 - 30 $^\circ$ betragen. Durch den Inklinationsfehler wird ein größerer Abstand zwischen Probenort und Paläomagnetpol vorgetäuscht, als er in Wirklichkeit vorhanden war. Bei der gegebenen Lagebeziehung zwischen den jungpaläozoischen Polpositionen und der Norddeutsch-Polnischen Senke kann sich der Inklinationsfehler nur auf die Paläobreite wesentlich auswirken, während er die Richtung des Paläomeridians, die zur Bohrkernorientierung verwendet wird, nicht oder nur unwesentlich zu beeinflussen vermag.

Auch eine unebene Sedimentationsfläche beeinflusst die Einregelung der Partikeln. Sie führt zu einem unsystematischen Fehler, dem Einbettungsfehler (bedding error). Einbettungsfehler und Paläogefälle beeinflussen vor allem die Inklination, während sie auf die Deklination nur in geringem Maße einwirken. Bei einer horizontalen Sedimentationsebene entspricht die schichtflächenparallele Vorzugsrichtung der Remanenz im Sediment der Richtung des Paläomeridians. Mit geringen Einschränkungen gilt dies sicher auch für die auf unebenen oder schrägen Flächen abgelagerten feinklastischen Sedimente.

2.1.4. Die Dipolhypothese

Die paläomagnetische Forschung geht von der Hypothese aus, daß das Erdfeld stets in erster Näherung einem axialen geozentrischen Dipol entsprach, wobei die Dipolachse mit der Rotationsachse der Erde zusammenfiel, wenn man über längere Zeiträume (ca. 10 4 a) mittelt. Etwa 90 % des Erdfeldes besitzen Dipolcharakter, während sich Richtung und Stärke des restlichen Teils laufend ändern und die Säkularvariation sowie die bekannten Abweichungen zwischen geographischen und magnetischen Polen

hervorrufen. Gegenwärtig befindet sich der magnetische Südpol bei 79 N/290 E (OPDYKE & HENRY 1969). Zahlreiche Autoren kamen zu dem Schluß, daß das Erdfeld stets in erster Näherung einem axialen geozentrischen Dipol ähnelte, der, über entsprechend lange Zeiträume gemittelt, mit der Rotationsachse zusammenfiel; so OPDYKE & HENRY (1969) für das Pliozän/Pleistozän, BRIDEN u.a. (1971) für Trias und Perm, VLASOV & KOVALENKO (1963) für Perm und Devon, CHLUPAC & KRS (1967) für das Devon, BUCHA (1964) für das Silur und SOFFEL (1972) für das Präkambrium. STEINHAUSER & VINCENZ (1973) stellten fest, daß das geomagnetische Hauptfeld sogar während der Polaritätswechsel seinen Dipolcharakter beibehielt.

Lokale Abweichungen um wenige Grad vom Normalfeld entstehen in der Umgebung stark magnetisierter Gesteine. Das Störfeld aller in der Nähe eines Ortes liegenden magnetisch wirksamen Massen ist jedoch klein gegenüber dem Normalfeld (ANGENHEISTER 1957). DOELL & COX (1963) untersuchten rezente Lavaströme auf Hawaii und maßen die durch eine starke magnetische Anomalie hervorgerufene Abweichung des Magnetfeldes auf der japanischen Insel Ooshima. Die Anomalie verursacht eine Abweichung der Inklination vom Normalfeld um $3,5^{\circ}$, während die Abweichung der Deklination kleiner ist. Obwohl folglich magnetische Anomalien im Untergrund die Genauigkeit der paläomagnetischen Ergebnisse beeinträchtigen, liegt der durch sie hervorgerufene Fehler im Bereich der Bearbeitungsfehler der Proben und hat deshalb keine Bedeutung für die Kernorientierung.

2.1.5. Das paläomagnetische Orientierungsprinzip

Da also die Voraussetzungen der paläomagnetischen Forschung, daß das magnetische Feld der Erde seit dem Präkambrium stets in erster Näherung einem axialen geozentrischen Dipol entsprach und daß die Richtung der charakteristischen Remanenz der Gesteine noch heute bestimmt werden kann, als gesichert gelten, ist es möglich, Bohrkerne zu orientieren, wenn man das Alter der charakteristischen Remanenz des Bohrkerns und die Lage der Paläopole in Beziehung zum Untersuchungsgebiet zur Entstehungszeit dieser Remanenz kennt. In den untersuchten Bohrkernen des Präzechsteins ist die erste Bedingung erfüllt, während man die Lage der jungpaläozoischen Pole sicher kennt (s. 2.3.1.).

Die Bohrkerne werden im heutigen geographischen Koordinatensystem paläomagnetisch orientiert, indem man die Richtung der schichtflächenparallelen Komponente der charakteristischen NRM im Bohrkern in Beziehung zur Schichteinfallene mißt (s.2.4.2.). Diese Richtung der charakteristischen Remanenz wird in Richtung des Paläomeridians zur Zeit der Bildung der Remanenz ausgerichtet und damit die Schichteinfallene des Bohrkerns orientiert. Die Richtung des Paläomeridians im Bereich der Bohrung berechnet man aus der Lage der Paläopole (s. 2.3.2.).

2.1.6. Die charakteristische Remanenz (CARM) und ihre Stabilität

Charakteristische remanente Magnetisierungen (CARM) sind DRM, CRM und TRM. Uncharakteristische remanente Magnetisierungen (UCARM) sind in den untersuchten Sedimentiten IRM (VRM), PRM und PTRM (s.2.1.2.).

Nach der Hypothese von AS & ZIJDERVELD (1958) besitzt die CARM eine höhere Koerzitivkraft und ist deshalb gegenüber der Entmagnetisierung stabiler als die jüngeren Störmagnetisierungen (VRM), die mittels Entmagnetisierung zerstört werden können. Da sich die initial gemessene NRM aus einer charakteristischen (stabilen) und einer (bzw. mehreren) uncharakteristischen (instabilen) Magnetisierungskomponente zusammensetzt, wechseln bei der Entmagnetisierung sowohl Richtung als auch Intensität der resultierenden Remanenz so lange, bis die uncharakteristische Remanenz zerstört ist. Während der Zerstörung der uncharakteristischen Remanenz im Wechsel-
feld kann auch ein Teil der charakteristischen Remanenz zerstört werden, wobei sich die Richtung der letztgenannten jedoch nicht ändert (COLLINSON 1969). Die charakteristische Remanenz eignet sich für Paläopolbestimmungen und für die nachträgliche Bohrkernorientierung, sofern man ihr Alter ermitteln kann.

Um die Aussagekraft der NRM im Probenmaterial einschätzen zu können, schlagen CHRAMOV (1958) [in PETROVA & ŽILJAEVA 1960], TARLING & SYMONS (1967), BRIDEN (1972), SYMONS & STUPAVSKY (1974) verschiedene Methoden zur Berechnung ihrer Stabilität vor. Alle Methoden verwenden nur die Richtungskonstanz der NRM bei der Entmagnetisierung als Kriterium für die Stabilität der Remanenz, nicht aber ihre Intensität. Die letztere ist komplexer Natur, in einer einfachen Formel schwierig zu systematisieren (TARLING & SYMONS 1967) und zeitlich variabel (ANGENHEISTER & SOFFEL 1972). So stellte MACKERETH (1971) bei der Untersuchung limnischer Tone, die seit der letzten Glazialzeit abgelagert wurden, eine Variation der Horizontalintensität von $2 \cdot 10^{-6}$ bis $2 \cdot 10^{-5}$ Gauß fest.

ROTHER (1971) unterteilt Proben entsprechend der Resistenz der Magnetisierungsintensität gegenüber Wechselfeldern in physikalisch stabile, metastabile und instabile. Behalten Proben bei der Entmagnetisierung ihre NRM-Richtung bei, so bezeichnet er sie als paläomagnetisch stabil, im Gegensatz zu paläomagnetisch instabilen Proben. - Die Begriffe "physikalisch stabil", "physikalisch instabil" und "paläomagnetisch instabil" werden in dieser Arbeit im Sinne ROTHERs gebraucht. Als "paläomagnetisch stabil" und damit für die Kernorientierung geeignet werden abweichend von ROTHER (1971) Proben bezeichnet, deren NRM-Richtungen nach der Zerstörung der uncharakteristischen Komponenten bei weiterer Entmagnetisierung relativ konstant bleiben.

Das paläomagnetische Orientierungsprinzip ist relativ unkompliziert. Die Bohrkernorientierung wird jedoch durch folgende Faktoren erschwert:

- eine Beprobung aus Bereichen mit Schrägschichtung oder synsedimentärem Deformationsgefüge,
- starke viskose Magnetisierungskomponenten,
- die Einwirkung des Bohrprozesses auf die Remanenz des Kerns,
- eine chemoremanente Magnetisierung unbekanntes Alters,

- die Säkularvariation,
- eine Beprobung von Gesteinen, die während einer Feldinversion abgelagert wurden,
- die Bohrlochabweichung,
- eine fehlerhafte Kopf-Krone-Orientierung des Bohrkerns,
- eine ungenaue Berechnung des Paläomeridians.

Art und Gewicht dieser Einflüsse auf die paläomagnetische Bohrkernorientierung werden untersucht und Möglichkeiten zu ihrer Eliminierung angegeben (s. Abschnitt 2.3. bis 2.6.3.).

2.2. Literaturübersicht

Diese Literaturübersicht kann trotz intensiver Recherche keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, da die Arbeiten zur magnetischen Bohrkernorientierung in einem sehr breiten Spektrum von Publikationsorganen erschienen.

2.2.1. Magnetische Bohrkernorientierung

Bereits in den 30er Jahren versuchte LYNTON, Bohrkerne anhand ihrer magnetischen Eigenschaften zu orientieren. LYNTON (1937) nahm an, daß die Richtung der Magnetisierung im Gestein und die des Erdfeldes übereinstimmen. Er maß die Richtung des Magnetisierungsvektors im Bohrkern mit Hilfe eines astatischen Magnetometers und orientierte ihn in Richtung des rezenten Erdfeldes. Ihm konnte noch nicht bekannt sein, daß sich die Lage der Paläomagnetpole in Beziehung zu den Krustenteilen der Erde im Laufe der geologischen Entwicklung systematisch wesentlich verändert hat. Infolgedessen stimmt die Magnetisierungsrichtung zumindest der prätertiären Gesteine nicht mit der rezenten Erdfeldrichtung überein, vor allem dann nicht, wenn der bei der Gesteinsgenese entstandene Anteil der remanenten Magnetisierung an der Gesamtremanenz groß ist. Das Orientierungsverfahren ergab folglich oft keine befriedigenden Ergebnisse (REICH 1941), ohne daß die Ursache hierfür erkannt werden konnte. DJUKOV (1946) prüfte ein von MOROZOV & STROCKIJ (1939) [in DJUKOV (1946)] entwickeltes Verfahren zur magnetischen Bohrkernorientierung, das auf dem gleichen Prinzip basiert wie das von LYNTON (1937) und sich von diesem nur durch die Orientierungstechnologie unterscheidet. LEGAT (1957) sowie TREY & FANINGER (1961) entwickelten das Verfahren von LYNTON weiter, ohne dessen grundlegenden Mangel zu erkennen.

Alle genannten Autoren berücksichtigen nicht, daß nur in känozoischen Gesteinen die Magnetisierungsrichtung etwa der heutigen Erdfeldrichtung entspricht, daß invers polarisierte Gesteine entgegengesetzt zur normalen Remanenzrichtung magnetisiert sind und daß in mesozoischen und älteren Gesteinen Remanenz- und rezente Erdfeldrichtung nur in Ausnahmefällen übereinstimmen, z.B. durch den Erwerb einer CRM in rezenter Zeit infolge der Verwitterung. In Einzelfällen erbrachte dieses Orientierungsprinzip durchaus gute Ergebnisse. Auf Grund der nicht erfüllten Voraussetzung - Erdfeld- gleich Magnetisierungsrichtung im Bohrkern - konnten jedoch die Ergebnisse oftmals nicht befriedigen; demzufolge setzte sich auch keines der Verfahren in der Praxis durch.

FULLER (1969) untersuchte den zweiten möglichen Weg zur magnetischen Bohrkernorientierung. Er ging davon aus, daß die Richtung der uncharakteristischen (viskosen) Magnetisierung im Gestein annähernd der rezenten Erdfeldrichtung entspricht. FULLER ermittelte mit Hilfe der Entmagnetisierung die Richtung der viskosen NRM-Komponente im Bohrkern, brachte diese Richtung mit der des Erdfeldes in Übereinstimmung, und der Bohrkern war orientiert. Die Kernorientierung soll auf diesem Weg mit einer Genauigkeit von 10° möglich sein. 1972 bestätigten RAINBOW, FULLER & SCHMIDT noch einmal die von FULLER (1969) getroffenen Aussagen.

Das Orientierungsverfahren mit Hilfe der viskosen remanenten Magnetisierung wurde mit Hilfe von Kernen aus kleinen, handgebohrten Bohrungen untersucht und bereite- te nach Aussagen des Autors infolge der oft sehr geringen Intensität der viskosen Remanenz bedeutende Schwierigkeiten. Nach FULLER (1969) ist das Verfahren nur in idealen Fällen anwendbar, und zwar, wenn die Kopf-Krone-Orientierung des Bohrkerns und die Geometrie der Bohrung genau bekannt sind, die Probe nicht aus dem Gebiet des magnetischen Äquators stammt und der Bohrprozeß keinen Einfluß auf die Richtung der uncharakteristischen Remanenz ausübte.

Das Orientierungsverfahren nach FULLER (1969) wurde anhand der hier untersuchten Bohrungen V und XI getestet. In beiden Bohrungen liegt die Schichteneinfallrichtung eindeutig fest (s. 4.2.1., 4.2.2.). Während die mit Hilfe der charakteristischen Remanenz ermittelten Schichteneinfalllinearen der Proben (paläomagnetische Kernorientierung) in beiden Bohrungen gut konzentriert sind, streuen die anhand der viskosen Remanenz bestimmten Schichteneinfalllinearen (magnetische Kernorientierung) stark und geben nicht die wahre Einfallrichtung wieder. Das liegt daran, daß

- die horizontale Komponente der viskosen Magnetisierung in den Bohrkernen sehr klein ist,
- die Richtung dieser Komponente in vielen Proben nicht sicher festgelegt werden kann und
- der Bohrprozeß die Richtung der horizontalen Komponente der viskosen Remanenz wahrscheinlich beeinflußt.

Eine nachträgliche Bohrkernorientierung mit Hilfe der viskosen NRM scheint deshalb in Tiefbohrungen unserer Breiten nicht möglich zu sein. In äquatornahen Bereichen, in denen die horizontale Komponente der viskosen Remanenz im Gegensatz zu unseren Breiten erheblich stärker ist als die vertikale Komponente, könnte die Kernorientierung mit Hilfe der viskosen Remanenz jedoch zum Erfolg führen.

2.2.2. Paläomagnetische Bohrkernorientierung

KAGELS (1970) orientierte erstmals Bohrkerne des Siles aus Tiefbohrungen der Norddeutsch-Polnischen Senke mit Hilfe der charakteristischen remanenten Magnetisierung (paläomagnetische Bohrkernorientierung), indem sie die Richtung der schichtflächenparallelen Komponente der charakteristischen NRM in Beziehung zur Schichteneinfall-lineare maß und diese Komponente in Richtung des Paläomeridians ausrichtete. - KAGELS (1970) beschrieb das paläomagnetische Orientierungsverfahren unvollkommen,

berücksichtigte einige Einflüsse (BA, Kopf-Krone-Orientierung, Feldinversionen), die die Ergebnisse verfälschen können, nicht und sicherte ihre Ergebnisse nicht durch auf anderem Wege ermittelte Schichteinfallrichtungen ab. Deshalb mußte das Verfahren zur nachträglichen Orientierung von Bohrkernen mit Hilfe der charakteristischen remanenten Magnetisierung in der vorliegenden Arbeit umfassender getestet werden. Es zeigte sich, daß neben der Streichrichtung entgegen der Meinung von KAGELS (1970) auch die Schichteinfallrichtung trotz der Feldinversionen festzulegen ist.

2.3. Das Paläokoordinatensystem im Untersuchungsgebiet

2.3.1. Mittlere paläozoische Polpositionen für Europa

Die mittleren Polpositionen Europas für die Systeme Ordovizium bis Perm wurden anhand der in der Literatur veröffentlichten Paläopollagen ermittelt. Die ausgewerteten Paläopolpositionen sind zum größten Teil bei IRVING (1960a, 1960b, 1961, 1962, 1963, 1965), IRVING & STOTT (1963) und McELHINNY (1968a, 1968b, 1969, 1970, 1972a, 1972b) tabelliert. Sie wurden durch neuere und von diesen Autoren nicht erfaßte Daten ergänzt und in Anlage 2 zusammengestellt.

Die Angaben zu den publizierten Paläopolpositionen sind meist zu lückenhaft (siehe 2.6.4.4.), um ihre Genauigkeit sicher einschätzen und vergleichen zu können. Jede Auswahl "sicherer" Werte ist so stark von subjektiven Faktoren abhängig, daß auf eine Bewertung der publizierten Paläopollagen verzichtet wurde. Es wurden die Paläopolpositionen der Osteuropäischen Tafel und aus jenen Gebieten Europas gemittelt, die seit der Genese des betreffenden Gesteins wahrscheinlich keine Relativbewegungen mehr in Beziehung zu Ureuropa durchgeführt haben. Die Paläopolpositionen gingen mit gleichem Gewicht in die Berechnung der mittleren Paläopollagen ein. Mittlere Deklination und mittlere Inklination sowie der Vertrauenskreis α_{95} und der Präzisionsparameter k für die mittleren Paläopollagen wurden nach den Gleichungen (9) bis (15) (siehe 2.5.1.) mit Hilfe des Programms PMAG ermittelt. Das Programm PMAG ist das leicht veränderte Programm MAGN (s. 2.5.1.). Mit ihm berechnet man zusätzlich zum Programm MAGN die Halbachsen der Konfidenzellipse um die mittlere Polposition δ_p und δ_m , da nach IRVING (1964, S. 70) der Vertrauenskreis nur kreisförmig ist, wenn Probenlokalität und Paläopol übereinstimmen. Der Paläopol liegt dann mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % in einem Kegel, dessen ellipsenförmige Grundfläche die Halbachsen δ_p (in Richtung des Paläomeridians) und δ_m (senkrecht zu δ_p) besitzt. Die Halbachsen berechnet man nach (1) und (2):

$$(1) \quad \delta_p = \frac{1}{2} \alpha_{95} (1 + 3 \cos^2 p)$$

und

$$(2) \quad \delta_m = \frac{\alpha_{95} \sin p}{\cos I} ,$$

wobei p die Poldistanz ist (IRVING 1964). p ergibt sich aus

$$(3) \quad p = 90^\circ - \lambda_p ,$$

während die Paläobreite (λ_p) nach (4) berechnet wird.

Da in die Berechnung von α_{95} , k , δp und δm (Tab. 3) alle extremen Paläopolpositionen mit eingegangen, spiegeln diese Werte die maximalen Fehler wider, mit denen die berechneten mittleren Paläopollagen behaftet sein können. Bei Eliminierung einiger stark abweichender Paläopole verändern sich die Positionen der mittleren Paläopole nur geringfügig, dagegen werden die Werte für α_{95} , δp und δm oft erheblich kleiner. Deshalb sind letztere nur Richtgrößen und keine absoluten Vergleichszahlen.

Tab. 3. Paläopolpositionen für Europa und das Paläokoordinatensystem im Untersuchungsgebiet (nach Daten der Anlage 2 berechnet); alle Angaben in Grad

| System | Mittlere Paläopolposition | | | | | | Stralsund | | Berlin | |
|------------|---------------------------|----|---------------|----|------------|------------|-------------|----------|-------------|----------|
| | E | N | α_{95} | k | δp | δm | Paläobreite | meridian | Paläobreite | meridian |
| Perm | 165 | 43 | 5,6 | 8 | 3,1 | 5,9 | 10,1 N | 21 E | 8,6 N | 21 E |
| Siles | 171 | 35 | 4,8 | 19 | 2,4 | 4,8 | 1,3 N | 18 E | 0,3 S | 18 E |
| Dinant | 152 | 31 | 8,1 | 11 | 4,1 | 8,1 | 2,4 N | 34 E | 0,9 N | 34 E |
| Devon | 157 | 29 | 11,2 | 5 | 5,6 | 11,2 | 1,5 S | 30 E | 3,0 S | 30 E |
| Silur | 143 | 25 | 32,0 | 3 | 16,0 | 32,0 | 0,6 N | 44 E | 0,9 S | 44 E |
| Ordovizium | 144 | 24 | - | - | - | - | 2,5 N | 42 E | 1,3 N | 42 E |

Die permischen Polpositionen der Osteuropäischen Tafel und Mesoeuropas einschließlich der Britischen Inseln sind außerordentlich gut konzentriert und ergeben infolgedessen einen sicheren mittleren VGP (virtual geomagnetic pole - axialer geozentrischer Dipol). Während des Perms gab es anscheinend keine chronologische Migration der Pollagen (PETERSON & NAIRN 1971), so daß für Rotliegendes und Zechstein keine getrennten VGP berechnet werden können.

Für das Karbon wird in der Literatur stets nur ein mittlerer VGP angegeben. Wenn man die VGP jedoch nach Siles und Dinant ordnet, so ergibt sich eine deutliche Differenz zwischen den mittleren Polpositionen während dieser Abteilungen. Das Karbon wird in der SU dreigeteilt. Mittel- und Oberkarbon im Sinne sowjetischer Autoren entsprechen in etwa dem mitteleuropäischen Siles; mittelkarbonische Polpositionen der SU sind deshalb dem Siles zugeordnet. Während die silesischen VGP der Osteuropäischen Tafel und von Mesoeuropa eine ähnlich gute Konzentration wie die permischen zeigen, streuen die des Dinant innerhalb der Osteuropäischen Tafel und auch innerhalb von Großbritannien relativ stark. Die Ursachen hierfür sind wahrscheinlich das weitgehende Fehlen roter Sedimentite, die zu den guten Ergebnissen von Siles und Perm erheblich beitragen, und die tektonische Unruhe infolge der variszischen Tektogenese.

Über den devonischen VGP für Europa diskutiert man seit mehr als 10 Jahren lebhaft. Die Ursache hierfür ist eine signifikante Abweichung zwischen den britischen und den norwegischen VGP. Da in beiden Gebieten die neueren Arbeiten die Ergebnisse ihrer Vorgänger stets weitgehend bestätigen, ist noch keine befriedigende Lösung gefunden. Anstelle einer Diskussion sei hier auf die wichtigste Literatur zu diesem Problem verwiesen: STORETVEDT, HALVORSEN & GJELLESTAD (1968); CREER (1970a, b);

McMURRY (1970); McELHINNY & BRIDEN (1971); STORETVEDT & PETERSEN (1972); SALLOMY & PIPER (1973b); BRIDEN, MORRIS & PIPER (1973); THORNING (1974).

Die norwegischen VGP basieren auf Untersuchungen an Old Red Sandsteinen und erscheinen als sehr zuverlässig, während die devonischen Gesteine der Britischen Inseln zum großen Teil spätpaläozoisch remagnetisiert wurden. Die britischen Paläopole wurden aus der Remanenzrichtung errechnet, die nach einer thermischen Entmagnetisierung der Gesteine kurz vor Erreichen des CURIE-Punktes vorlag. Da fraglich ist, ob diese Remanenzrichtung gleich der devonischen Paläofeldrichtung ist, und die norwegischen Paläopole besser mit den sowjetischen Angaben übereinstimmen als die britischen, wurde der mittlere devonische VGP für Europa aus den sowjetischen und norwegischen VGP berechnet.

Für das Silur sind nur wenige VGP für Eurasien veröffentlicht worden (Anlage 2). Der mittlere silurische VGP für Europa wurde aus drei Angaben von der Osteuropäischen Tafel und einer aus der ČSSR, die in ihrer Lage etwa übereinstimmen, ermittelt.

Die europäischen Paläopole des Ordoviziums reichen zur Zeit nicht aus, um einen relevanten mittleren VGP zu berechnen, weil

- die VGP aus verschiedenen Gebieten stark voneinander abweichen,
- die auf einem eng begrenzten Raum gesammelten Ergebnisse (z.B. ČSSR) ebenfalls stark differieren und
- einige ordovizische Gesteine wahrscheinlich eine postordovizische Remanenz tragen.

Da man eine postordovizische Horizontalverschiebung zwischen der Osteuropäischen Tafel und Großbritannien nicht ausschließen kann, sind die 1973 zahlreich veröffentlichten ordovizischen Polpositionen der Britischen Inseln (Geophys. J. roy. astron. Soc. 34, 1) hier nicht berücksichtigt worden. Das für die Bohrkernorientierung verwendete Paläokoordinatensystem des Ordoviziums wurde nach der von CHRAMOV, RODIONOV & KOMISSAROVA (1965) veröffentlichten mittleren Polposition für den europäischen Teil der Sowjetunion berechnet.

In Tab. 3 sind die für die nachträgliche Bohrkernorientierung berechneten mittleren Paläopolpositionen Europas für die Systeme Ordovizium bis Perm zusammengestellt. Ihnen liegen die in der Anlage 2 tabellierten Daten zugrunde.

2.3.2. Paläobreite und Paläomeridian

Ein Bohrkern wird paläomagnetisch orientiert, indem die schichtflächenparallele Komponente der charakteristischen Remanenz einer Probe mit einer DRM mit der Richtung des Paläomeridians am Probenort in Übereinstimmung gebracht wird. Zu diesem Zweck sind die paläogeographische Breite des Untersuchungsgebietes und die Richtung des Paläomeridians in diesem Gebiet zu ermitteln, nachdem man zuvor anhand der publizierten Paläopolpositionen die mittlere Lage des Paläopols berechnet hat. Die Paläobreite des Probenorts wird nach

$$(4) \quad \sin \lambda_p = \sin \lambda \sin \lambda' + \cos \lambda \cos \lambda' \cos (\Phi' - \Phi)$$

(IRVING 1964, S. 186) ermittelt. Dabei sind:

- λ_p - Paläobreite des Probenorts,
- λ - geographische Breite des Probenorts,
- λ' - geographische Breite des Paläopols,
- Φ - geographische Länge des Probenorts,
- Φ' - geographische Länge des Paläopols

(vgl. Abb. 2). Die Richtung des Paläomeridians am Probenort ergibt sich nach IRVING (1964), S. 186 aus

$$(5) \quad \sin \phi_p = \frac{\sin (\Phi' - \Phi) \cos \lambda'}{\cos \lambda_p} ,$$

wobei ϕ_p den Winkel zwischen rezentem und Paläomeridian bezeichnet. Mit Hilfe der Statistik von FISHER (1953) ist es möglich, die Lagesicherheit der Paläomeridiane einzuschätzen. Bei einer Lage des Untersuchungsgebietes nahe dem Paläoäquator entspricht die Halbachse δm der Konfidenzellipse dem Winkelbereich um die Paläomeridianrichtung herum, in dem mit 95%iger Wahrscheinlichkeit der Paläomeridian liegt.

Richtungen und Konfidenzbereiche (δm) der Paläomeridiane sowie die Paläobreiten im Untersuchungsgebiet für die Systeme Ordovizium bis Perm sind auf der Grundlage der gesammelten Paläopolpositionen (Anlage 2) berechnet und in Tab. 3 aufgeführt. Die Ergebnisse zeigen, daß das Gebiet der Norddeutsch-Polnischen Senke vom Ordovizium bis zum Perm nahe dem Paläoäquator lag. ROTHER (1971) kam anhand paläomagnetischer Untersuchungen von Gesteinen vom Gebiet der DDR zu ähnlichen Paläobreiten wie den hier ermittelten. Die Richtungsgenauigkeit der Paläomeridiane ist im Perm und Siles sehr gut und im Dinant und Devon befriedigend (Tab. 3), obwohl bei der Berechnung von α_{95} und δm alle extremen Paläopolagen berücksichtigt wurden. Die wahre Abweichung von der ermittelten Richtung des Paläomeridians ist in praxi sicher kleiner als die mit 95%iger Sicherheit berechnete obere Toleranzgrenze (δm). Die für das Silur und das Ordovizium ermittelten Paläomeridianrichtungen sind dagegen relativ unsicher.

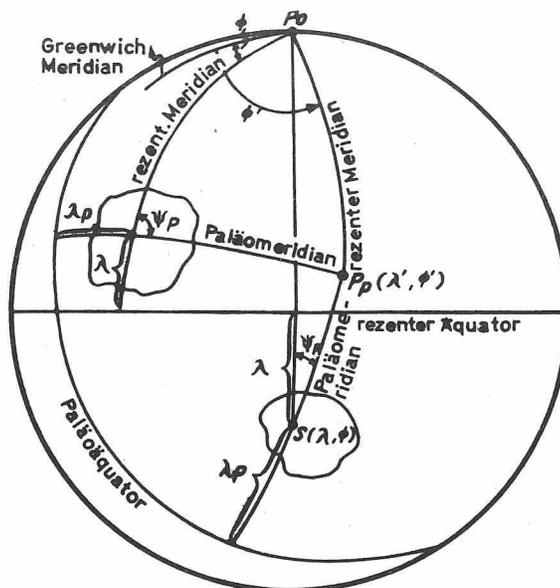


Abb. 2

Berechnung von Paläobreite und Richtung des Paläomeridians (nach IRVING 1964)

- S - Bezugslokalität (Probenort)
- P_0 - geogr. Nordpol
- P_p - Paläopol
- λ_p - Paläobreite

2.4. Probenbearbeitung

2.4.1. Probennahme und -aufbereitung

Die sorgfältige Auswahl der Proben entscheidet über Erfolg oder Mißerfolg der paläomagnetischen Kernorientierung. Deshalb muß man der Probennahme sehr große Aufmerksamkeit widmen. Will man z.B. Streichen und Fallen der Schichtung bestimmen, so muß ein deutliches Fallen (5°) am Bohrkern vorhanden sein, damit die Richtung der Einfalllineare am Kern eindeutig auszumachen ist. Wenn die am senkrecht stehenden Kern festzulegende Einfalllineare (scheinbare Einfalllineare - sEL) nicht mit der im Anstehenden (wahre Einfalllineare - EL) identisch ist, so orientiert man Kern und scheinbare Einfalllineare richtig, erhält aber nicht die wahre Schichteneinfallrichtung. Auf die Probleme, die hiermit, mit der Schichtfläche und mit der Schrägschichtung zusammenhängen, wurde in Abschnitt 2.1.1. eingegangen.

Synsedimentäre Deformationsgefüge sowie Kerne aus Bereichen mit Bioturbation und Gasentweichungen dürfen nicht beprobt werden, da hier das primäre Sedimentgefüge zerstört ist (FÜCHTBAUER & MÜLLER 1970) und damit die ursprüngliche Einregelung der magnetischen Partikeln. Zudem sind nach HELLBARDT (1959) Proben mit sichtbaren Materialinhomogenitäten in den meisten Fällen magnetisch nicht brauchbar. Um repräsentative Proben zu erhalten, ist es günstiger, in der Mitte von Gesteinseinheiten zu beproben als in Grenzbereichen (SCHENK 1970).

Es ist notwendig, sich vor der Beprobung einen Überblick über die BA in den gekernten Bereichen zu verschaffen. Die BA übt einen Einfluß sowohl auf die Größe des Schichteneinfallens als auch auf die Richtung der sEL am Bohrkern aus (s. 2.6.3.1.). Je größer das Einfallen am Kern und je kleiner die Bohrlochneigung sind, um so geringer kann die maximale Abweichung zwischen wahrer und scheinbarer Einfalllineare am Kern sein. Um unnötige Komplikationen zu vermeiden, beprobt man nur Kerne, deren Kopf-Krone-Orientierung eindeutig festliegt. Bei einer fehlerhaften Kopf-Krone-Orientierung (die in den meisten Fällen erkennbar ist, s. 2.6.4.1.) spiegeln die berechneten Einfalllinearen die Schichteneinfallrichtung verkehrt wider (s. 2.6.3.2.).

Eine Probennahme ist nur dort sinnvoll, wo entsprechend der Erfahrung eine meßbare und stabile Remanenz zu erwarten ist. In graufarbenen Sedimentiten kommt eine solche Magnetisierung in Ton- und Siltsteinen viel häufiger als in Sandsteinen vor. Rote Sedimentite haben im allgemeinen eine starke, sehr stabile Remanenz (CRM). Wenn das Alter dieser Remanenz sicher bestimmt werden kann (s. 2.6.2.1.), sind diese Sedimentite zur Beprobung besonders zu empfehlen. Nach SOFFEL (1972) eignen sich für paläomagnetische Untersuchungen die Gesteine am besten, die einen primären Hämatitgehalt haben, sofern die Hämatitkörner in dem Korngrößenbereich liegen, bei dem sie stark antiferromagnetisch sind.

Aus den genannten Gründen unterläßt man am besten eine Beprobung in dafür ungünstig erscheinenden Kernmärschen. Proben werden aus parallel-, flaser-, linsen- und mikroschrägschichteten Kernstrecken entnommen, in denen die Schichtflächen eben sind und die Kerne die zum Schneiden notwendige mechanische Festigkeit aufweisen.

Nach der Beprobung ist der Bohrkern mit Hilfe von Knetmasse senkrecht zu stellen. Mit dem zweikreisigen Geologenkompaß 59 (Freiberger Modell) wird die Einfalllineare auf der Schichtfläche markiert und das Fallen am Kern gemessen. Mit Hilfe einer Diamanttrennscheibe sägt man mehrere Würfel mit der Kantenlänge von 20 mm parallel zur Schichteinfalllineare und zur Schichtfläche aus der Kernprobe heraus. Voraussetzungen für eine exakte Bestimmung der Richtung des Remanenzvektors relativ zur Einfalllineare am Kern sind Rechtwinkligkeit und Maßhaltigkeit der Würfel. Eine Toleranz von 1° und $1/10$ mm soll möglichst nicht überschritten werden. Zerbrochene Würfel werden nach Reinigung der Bruchflächen mit Duosan Rapid wieder zusammengeklebt. Während der gesamten Bearbeitung ist darauf zu achten, daß der Richtungspfeil am Würfel nicht umorientiert wird.

Die Anzahl der zu untersuchenden Proben richtet sich nach der Zielstellung der Bearbeitung. BIRKENMAJER & NAIRN (1964) nahmen pro Aufschluß 6 Proben. Auch DOELL & COX (1963) sowie ROTHER (1971) betrachteten die Entnahme von 6 Proben je Lavastrom bzw. Aufschluß als optimal. Entsprechend diesen Hinweisen wurden je Bohrung und System nach Möglichkeit mindestens 6 Proben à 6 Würfel untersucht (zur Optimierung des Verfahrens siehe Abschnitt 2.7.).

2.4.2. Messung der Remanenz und "magnetische Säuberung"

Die NRM der untersuchten Probenwürfel wurde mit dem hochempfindlichen Rockgenerator von JELINEK (1966) gemessen, mit dem Remanenzen bis zu $4 \cdot 10^{-9}$ CGSM-Einheiten bestimmbar sind. Er mißt damit um zwei Zehnerpotenzen kleinere Remanenzen als die von AUSTER & WAGNER (1965) sowie BERSSET (1968) beschriebenen Rockgeneratoren.

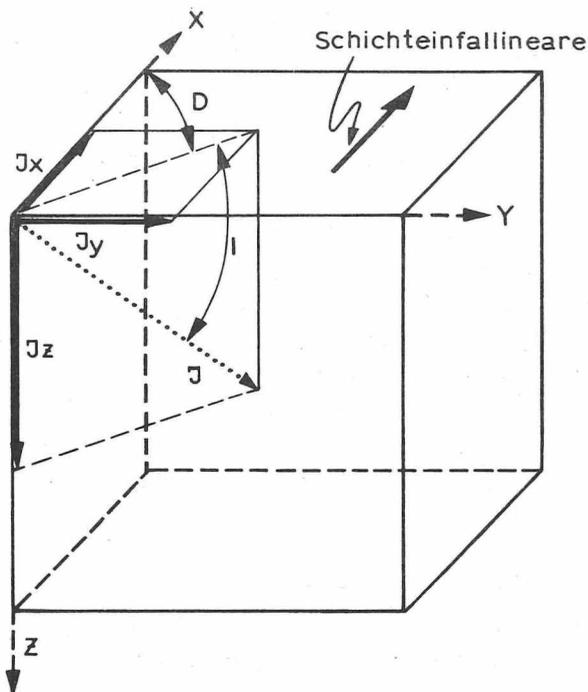


Abb. 3 Probenwürfel mit Magnetisierungsvektor

Abb. 3 zeigt einen orientierten Probenwürfel und die Lage eines Remanenzvektors darin. Jeder Würfel wurde in 6 Lagen gemessen, so daß zur arithmetischen Mittelwertbildung für die drei Komponenten J_x , J_y und J_z je vier Werte zur Verfügung standen (das Gerät mißt zwei Komponenten gleichzeitig). Nach der initialen Messung wurden die Proben mit Hilfe einer Wechselfeldanlage stufenweise entmagnetisiert, um viskose Magnetisierungskomponenten zu entfernen. Nach jedem Entmagnetisierungsschritt waren Intensität und Richtung der NRM neu zu messen. Wie bei ROTHER (1971) wurden die Proben bei 50, 100, 200, 400 und 800 Oe entmagnetisiert. DOELL & COX (1963) wählten die Entmagnetisierungsschritte bei 25, 50, 100, 200, 400 und 800 Oe in ähnlicher Weise aus. Während der Entmagnetisierung war das Erdfeld in der Umgebung des Probenhalters mit Hilfe von HELMHOLTZ-Spulen abgeglichen.

2.5. Auswertung der Messungen

2.5.1. Formelwerk

Die Intensität der Remanenz ergibt sich aus

$$(6) \quad J = \sqrt{J_x^2 + J_y^2 + J_z^2} \quad [T](= \text{Tesla}).$$

Die Raumlage des Magnetisierungsvektors in Beziehung zur Schichteneinfallene ist durch die Deklination und Inklinasion bestimmt (Abb. 3). Die Deklination D ist der Winkel zwischen der Schichteneinfallrichtung bzw. der willkürlich festgelegten Bezugslinie (x -Achse) und der Projektion des Magnetisierungsvektors auf die Schichtfläche (x - y -Ebene), im Uhrzeigersinn gemessen:

$$(7) \quad \tan D = \frac{J_y}{J_x} \quad (0^\circ \leq D \leq 360^\circ).$$

Für D ergibt sich folgende Quadrantenlage:

| | | | | | |
|-------|----|-----|------|-----|----------|
| J_x | + | - | - | + | |
| J_y | + | + | - | - | |
| | I. | II. | III. | IV. | Quadrant |

Die Inklinasion ist der Winkel zwischen dem Magnetisierungsvektor und der schichtflächenparallelen Magnetisierungskomponente (D), nach unten positiv gemessen:

$$(8) \quad \tan I = \frac{J_z}{\sqrt{J_x^2 + J_y^2}} \quad (-90^\circ \leq I \leq 90^\circ).$$

Die Magnetisierungsrichtung in einem Sedimentgestein variiert mehr oder weniger stark (HELLBARDT 1959). Mit Hilfe der Statistik von FISHER (1953) [in IRVING (1964)], die sich mit der Verknüpfung von Richtungswerten auf einer Kugeloberfläche beschäftigt, wird die mittlere Richtung (z.B. der Remanenz in einem Bohrkern) aus einer beliebigen Anzahl von Richtungswerten (z.B. von Probenwürfeln) ermittelt und deren Ge-

naugigkeit abgeschätzt. Diese Richtungsstatistik ist der arithmetischen Mittelwertbildung überlegen. Es wird angenommen, daß N Richtungen axialsymmetrisch um die mittlere Richtung verteilt sind. Die Richtungskosinus l_i , m_i und n_i der i -ten Richtung D_i , I_i , die als Einheitsvektoren betrachtet werden, sind

$$(9) \quad l_i = \cos I_i \cos D_i ; \quad m_i = \cos I_i \sin D_i ; \quad n_i = \sin I_i .$$

FISHER zeigte, daß die beste Näherung an die wahre mittlere Richtung durch die Summe der N Einheitsvektoren der einzelnen Richtungen (l_i , m_i , n_i) präsentiert wird. Die Richtungskosinus der mittleren Richtung ergeben sich aus

$$(10) \quad l = \frac{\sum_{i=1}^N l_i}{R} , \quad m = \frac{\sum_{i=1}^N m_i}{R} , \quad n = \frac{\sum_{i=1}^N n_i}{R} ,$$

wobei

$$(11) \quad R^2 = \left(\sum_{i=1}^N l_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N m_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N n_i \right)^2$$

ist. Die Deklination (D_m) und die Inklination (I_m) der mittleren Richtung ergeben sich aus

$$(12) \quad \tan D_m = \frac{\sum_{i=1}^N m_i}{\sum_{i=1}^N l_i} = \frac{m}{l} \quad (0^\circ \leq D_m \leq 360^\circ) ;$$

$$(13) \quad \sin I_m = \frac{\sum_{i=1}^N n_i}{R} = n \quad (-90^\circ \leq I_m \leq 90^\circ) .$$

Über die Verteilung der Endpunkte der Einheitsvektoren gibt der Präzisionsparameter k Auskunft. Wenn k gleich Null ist, so sind die Einheitsvektoren gleichmäßig über die Kugel verteilt und die Richtungen zufällig. Ist k groß, so sind die Richtungen auf einen kleinen Teil der Kugel - nahe der mittleren Richtung - beschränkt. FISHER [in IRVING (1964)] zeigte, daß die beste Näherung für k durch

$$(14) \quad k = \frac{N - 1}{N - R}$$

gegeben ist.

Die Genauigkeit der berechneten mittleren Richtung wird mit Hilfe des "Vertrauenkreises" (circle of confidence) abgeschätzt. Die mittlere von N Richtungen liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von $(1 - P)$ in einem Kegel, dessen Achse die mittlere Richtung ist und dessen halber Öffnungswinkel durch

$$(15) \quad \cos \alpha_{(1-P)} = 1 - \frac{N - P}{R} \left\{ \left(\frac{1}{P} \right)^{\frac{1}{N-1}} - 1 \right\}$$

gegeben ist. Für P wird gewöhnlich 0,05 gewählt, und der entsprechende Wert für α_{95} ist der Radius des Vertrauenskreises bzw. des Kegels, in dem mit 95%iger Wahrscheinlichkeit die mittlere Richtung liegt.

Nach IRVING (1964) berechnet man die mittlere Remanenzrichtung für Proben, Aufschlüsse und Gesteinseinheiten. Jeder Wert, der in die Mittelwertbildung eingeht, hat dabei das gleiche Gewicht.

In dieser Arbeit wurde die mittlere Magnetisierungsrichtung der Proben aus den Remanenzrichtungen der zu ihr gehörenden Würfel ermittelt und für alle Proben k , α_{99} , α_{95} und α_{63} berechnet.

Für die rechnerische Bearbeitung der an den Probenwürfeln gemessenen drei Komponenten der NRM wurde unter Mithilfe von Frau DEUTSCH, Rechenzentrum der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, das Programm MAGN in ALGOL 60 für den R 300 geschrieben. Mittels Lochstreifen gibt man die kombinierte Proben-/Würfelnummer sowie die am Würfel gemessenen drei Komponenten der NRM ein. Aus diesen Daten werden nach (6) bis (15) Intensität, Deklination und Inklination der NRM für jeden Probenwürfel, die mittlere Deklination D_m und die mittlere Inklination I_m der Probe, der Konfidenzparameter k und die Vertrauenskreise α_{99} , α_{95} und α_{63} ermittelt und ausgedruckt. Abschließend wird die Intensität der NRM in jedem Würfel nach jeder Entmagnetisierungsstufe in bezug zur initialen Messung in Prozenten berechnet.

2.5.2. Nordorientierung des Bohrkerns

Wenn für jede Probe die mittlere schichtflächenparallele Richtung der Remanenz (D_m) relativ zur Schichteinfalllineare bestimmt (s. 2.5.1.) sowie die Richtung des Paläomeridians am Probenort berechnet ist (s. 2.3.2.), transformiert man mit Hilfe des polaren SCHMIDTschen Netzes die Schichteinfalllineare am Kern in ihre wahre Lage im geographischen Koordinatensystem. Dabei wird die untere Lagenhalbkugel benutzt.

1. Die berechnete Paläomeridianrichtung wird direkt auf dem SCHMIDTschen Netz markiert (Abb. 4a).
2. In die auf dem SCHMIDTschen Netz liegende Oleate trägt man in Nordrichtung die Schichteinfalllineare und die mittlere Deklination (D_m) von N über E ein (Abb. 4b).
3. Die mittlere Deklination (D_m) bringt man mit der Paläomeridianrichtung in Übereinstimmung und liest die Richtung der Schichteinfalllineare im geographischen Koordinatensystem aus dem SCHMIDTschen Netz ab (Abb. 4c,d).
4. Hat die Probe eine positive Inklination und lag das Untersuchungsgebiet zur Bildungszeit der Remanenz auf der Nordhalbkugel, so ist der schichtflächenparallele Remanenzvektor bei der gegebenen Konfiguration zwischen der Norddeutsch-Polnischen Senke und den paläozoischen Paläopolen (außer Kambrium und eventuell Ordovizium) in Richtung des Paläomeridians auszurichten, der im NE-Quadranten des SCHMIDTschen Netzes liegt. Bei negativer Inklination erfolgt die Ausrichtung in die entgegengesetzte Richtung. Lag das Gebiet auf der PaläoSüdhalbkugel, so verfährt man umgekehrt.

5. Ist die Inklination sehr klein oder die Paläolage des Untersuchungsgebietes nördlich oder südlich des Äquators nicht eindeutig bekannt, so kann lediglich die Streichrichtung, nicht aber die Einfallrichtung festgelegt werden. Mit Hilfe der BA ist es jedoch in den meisten Fällen möglich, zu entscheiden, welche der beiden in Frage kommenden Schichteinfallrichtungen die richtige ist (s. 3.2.1.).

Nach KAGELS (1970) gestattet die paläomagnetische Bohrkernorientierung nur die Bestimmung des Streichens, nicht aber die der Schichteinfallrichtung. Die nachträgliche Auswertung der Messungen von KAGELS (1970) entsprechend dem obengenannten Prinzip ergab für die Bohrung II im Siles eine Einfallrichtung nach SW, die zuvor zwar postuliert wurde, aber nicht bewiesen werden konnte (Abb. 5).

Abb. 4
N-Orientierung einer Probe mittels Transformation ihrer mittleren Deklination (D_m) in Richtung des Paläomeridians

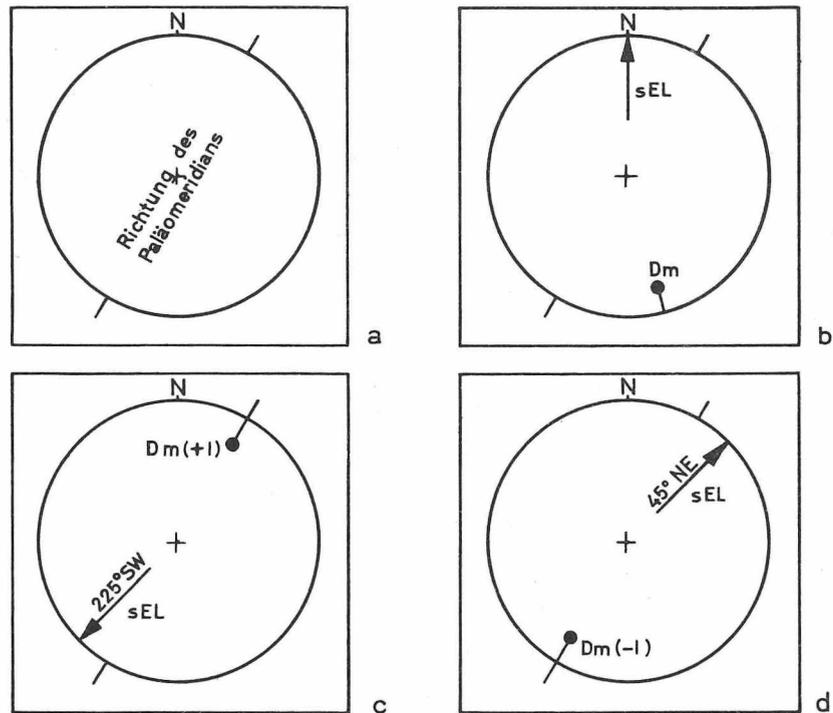
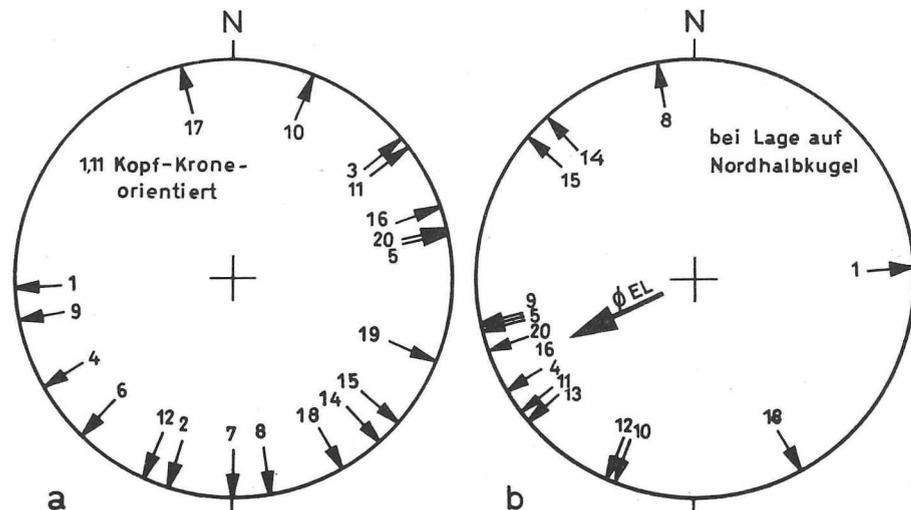


Abb. 5
Richtung der Schichteinfalllinearen im Siles der Bohrung II
a - nach KAGELS (1970) (verändert)
b - bei Berücksichtigung des Vorzeichens der Inklination und der Kopf-Krone-Orientierung



2.5.3. Neigungskorrektur

In einem posttektonisch remagnetisierten Schichtkomplex (s. 2.6.2.1.) mit einer CRM entspricht die ermittelte schichtflächenparallele Remanenzrichtung nicht der horizontalen Richtung des Paläomagnetfeldes zur Zeit der Remagnetisierung. Letztere ist entgegen den Verhältnissen bei einer Ablagerungsmagnetisierung (DRM) schichtunabhängig, und infolgedessen orientiert man den Kern falsch. Mittels einer Neigungskorrektur muß deshalb die wahre horizontale Paläofeldrichtung im Bohrkern ermittelt werden.

Die J_y -Achse der Probenwürfel ist - entsprechend dem Beprobungsprinzip - die horizontale Achse, um welche die Schichten gekippt bzw. gefaltet wurden (Abb. 3). Um diese Achse muß der gemessene Remanenzvektor (D_m, I_m) je nach der Größe der Schichtneigung gedreht werden, damit man die wahre horizontale Richtung des Paläomagnetfeldes im Bohrkern erhält. Die parallel zur Kipp- bzw. Faltenachse gerichtete J_y -Komponente bleibt bei der Neigungskorrektur konstant und infolgedessen auch die Resultierende aus J_x und J_z , wobei eine horizontale bzw. nur schwach abtauchende Faltenachse vorausgesetzt wird. Das Größenverhältnis der J_x - und der J_z -Komponente verschiebt sich dagegen (Abb. 6a,b). Vergrößert oder verkleinert sich der Betrag der J_x -Komponente bei konstanter J_y -Komponente, so erhält man nach (7) eine veränderte Deklination in der Probe und damit auch eine andere Orientierung des Bohrkerns. Deshalb muß für alle Proben mit einer posttektonisch erworbenen Remanenz eine Neigungskorrektur vorgenommen werden.

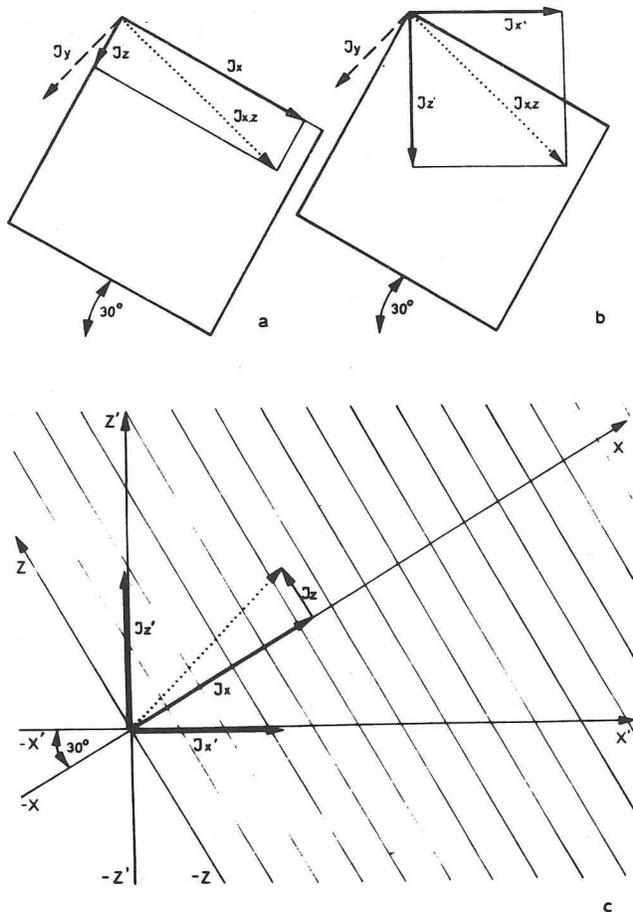


Abb. 6

- a. J_x, J_y, J_z am schichtparallelen Würfel
- b. transformierte NRM-Komponenten J'_x und J'_z
- c. Nomogramm zur Transformation der schichtflächenbezogenen Komponenten J_x, J_y und J_z in die bohrlochachsenbezogenen Komponenten J'_x und J'_z bei 30° Schichteinfallen (mit Beispiel)

In diesem Stadium der Bohrkernorientierung ist das wahre Fallen infolge der BA noch nicht bekannt. Folglich kann man die Schichtneigungskorrektur nur entsprechend dem scheinbaren Fallen am Kern in das bohrlochachsenbezogene anstatt in das horizontale Koordinatensystem vornehmen. Der dadurch entstehende Fehler ist in den untersuchten Proben wegen der relativ kleinen Bohrlochneigung (max. 16°) gering und beeinflusst deshalb die Genauigkeit der paläomagnetischen Kernorientierung nicht wesentlich.

Zur Transformation der schichtflächenorientierten J_x - und J_z -Komponenten in die bohrlochachsenbezogenen J'_x - und J'_z -Komponenten wurden Nomogramme entwickelt. Ein Beispiel ist in Abb. 6c gegeben. Für jeden am Bohrkern gemessenen Schichteinfallwert fertigt man auf Millimeterpapier ein solches Nomogramm an und kann so die Komponenten entsprechend dem gegebenen Beispiel (Abb. 6) mit Hilfe eines Stechzirkels transformieren. Weiterhin ist es möglich, die Komponenten J'_x und J'_z anhand der Formel für die Drehung des Achsenkreuzes

$$(16) \quad J'_x = J_x \cos \varphi' - J_z \sin \varphi'$$

und

$$(17) \quad J'_z = J_x \sin \varphi'' + J_z \cos \varphi''$$

(φ'' = Fallen am Kern) zu berechnen.

2.6. Ergebnisse

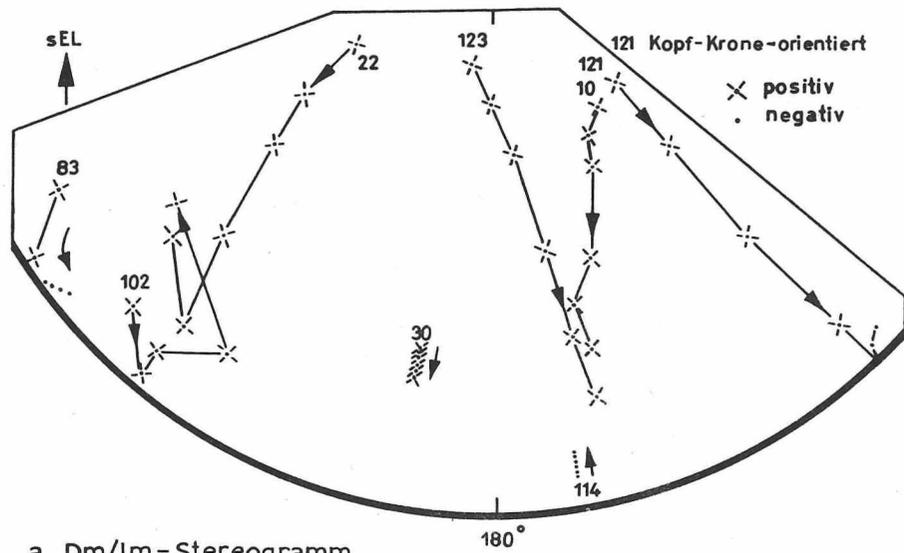
2.6.1. Remanenz der Bohrkern

2.6.1.1. Isolierung der charakteristischen Remanenz

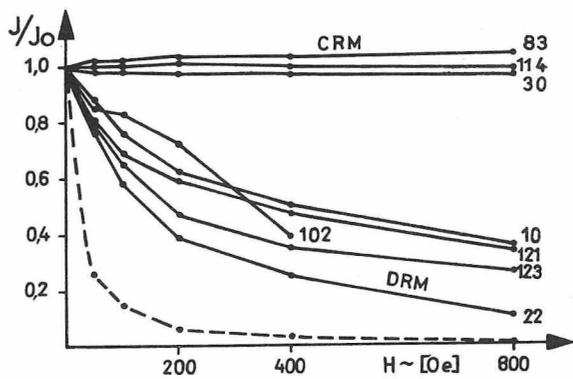
Alle bearbeiteten Proben wurden im Wechselfeld bei 50, 100, 200, 400 und 800 Oe entmagnetisiert, um die uncharakteristischen NRM-Komponenten zu zerstören und die CARM zu isolieren. Während der Entmagnetisierung ändert sich die Inklination der Remanenz erheblich stärker als die Deklination (Abb. 7). Letztere zeigt oft keine merkliche systematische Änderung. Demzufolge besitzt die uncharakteristische Remanenz eine starke vertikale Komponente.

Die Entmagnetisierungskurven in Abb. 7 zeigen typische Beispiele für Proben mit einer DRM bzw. CRM. Wie die Entmagnetisierungskurven, so macht auch das Dm/Im-Stereogramm (Abb. 7a) den Unterschied zwischen Proben mit einer DRM bzw. CRM deutlich. In einem Gestein mit einer CRM haben die weniger stabilen Remanenzen nur einen kleinen Anteil an der resultierenden Remanenz und sind gut von der CRM zu trennen (Abb. 7b). Die DRM ist in der Regel physikalisch stabiler als IRM, PRM und PTRM, hat jedoch einen geringeren Anteil an der Gesamtremanenz als die CRM. Infolgedessen ist es in einigen Proben schwierig (graue Sandsteine), die DRM zu isolieren.

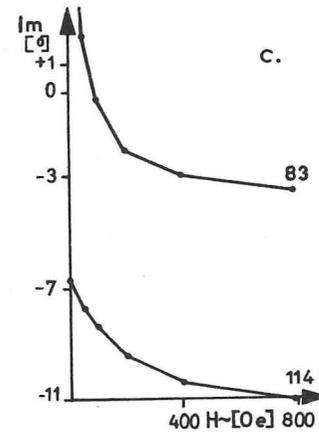
Einen steilen Abfall der Intensität (in Abb. 7 gestrichelt) kann man in keiner Bohrkernprobe beobachten. Es ist anzunehmen, daß diese Kurvenform bei der Entmagnetisierung stark angewitterter Proben infolge der Zerstörung einer sehr starken,



a. Dm/Im-Stereogramm



b. Entmagnetisierungskurven



c-f. Inklinationskurven

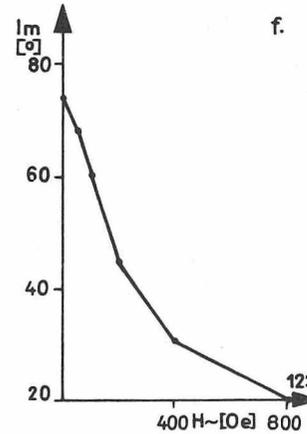
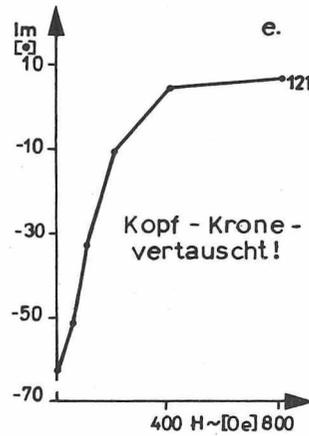
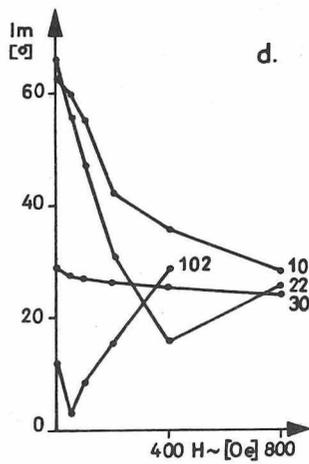


Abb. 7 Typisches Verhalten der NRM bei Entmagnetisierung

physikalisch und paläomagnetisch instabilen Komponente der NRM entsteht. Eine Probe ist "magnetisch gesäubert", wenn bei der Entmagnetisierung ein Zustand erreicht wird, bei dem das Verhältnis $J_x : J_y : J_z$ konstant bleibt (RUNCORN 1967). Wie Dm/Im-Stereogramme, Entmagnetisierungskurven und Inklinationenkurven zeigen, ist in den bearbeiteten Proben mit einer DRM der Hauptteil der uncharakteristischen Remanenz bei 100 bis 400 Oe zerstört. AS & ZIJDERVELD (1958) geben dafür mehr als 300 Oe, VLASOV & KOVALENKO (1963) 160 Oe, CHRAMOV, RODIONOV & KOMISSAROVA (1965) 100 Oe, ŽILJAEVA (1965) 150 - 200 Oe, ANDREEVA, BUCHA & PETROVA (1965) 200 Oe, RUNCORN (1967) 300 Oe, SOFFEL & SUPALAK (1968) 400 Oe und MULDER (1971) 200 - 300 Oe an.

Eine vollständige "magnetische Säuberung" im Sinne von RUNCORN (1967) gelang in keiner Probe. Deshalb wurden in den meisten Fällen die Deklinationen nach der "magnetischen Säuberung" bei 100 - 400 Oe zur Bohrkernorientierung verwendet (Anlage 1). In Proben mit einer CRM veränderten sich Richtung und Intensität der Remanenz während der Entmagnetisierung nur unwesentlich (Abb. 7a,b), so daß die Deklination bei 400 bzw. 800 Oe zur Interpretation genutzt wurde. Diese extrem hohe Stabilität gegenüber der Wechselfeldentmagnetisierung stellten u.a. auch BAGINA (1966), COLLINSON (1969), BUREK (1969) und FULLER (1969) fest.

Bei einigen Proben mit einer DRM treten zwischen 400 und 800 Oe enorme Richtungsänderungen des Remanenzvektors auf. Das liegt nicht an der Zerstörung der uncharakteristischen Remanenz, sondern daran, daß nach der Entmagnetisierung bei 800 Oe die NRM-Intensitäten im Meßfehler des Rockgenerators liegen.

KINOSHITA & MERRILL (1972) zeigten, daß Sedimentkerne aus dem Nordpazifik z.T. eine uncharakteristische NRM-Komponente haben, die relativ stabil gegenüber Wechselfeldentmagnetisierung ist. Solch eine NRM kann man in den untersuchten Proben nicht an der Deklination, wohl aber an der Inklination erkennen. Während des gesamten Jungpaläozoikums lag das Gebiet der Norddeutsch-Polnischen Senke südlicher als rezent. Deshalb muß die Inklination in den Proben kleiner sein als die jetzige von ca. 70° , zumal infolge von Überlagerungsdruck (s. 2.6.2.2.) und Inklinationsfehler (s. 2.1.3.) im allgemeinen die gemessene Inklination kleiner als die primäre ist. Bei einer paläographischen Breite von $\leq 30^\circ$ beträgt die Inklination der Remanenz entsprechend dem Modell einer homogen magnetisierten Kugel maximal 49° . Alle Proben mit einer Inklination größer und nahe 50° nach der Entmagnetisierung sind deshalb mit Vorsicht zu interpretieren. Die hohen Inklinationen einiger Proben der Bohrungen IV, V, VI und VII, die der paläogeographischen Breite des Untersuchungsgebietes im Paläozoikum nicht entsprechen, können in Zeiten mit einer verstärkten Säkularvariation entstanden sein. Diese Deutung bietet sich an, da man eine postpermische Remagnetisierung der Proben ausschließen kann (s. 2.6.2.1.).

Die Intensität der NRM ändert sich in den hier untersuchten, megaskopisch isotropen Gesteinen z.T. im Dezimeterbereich bis zu einer Zehnerpotenz, während die Richtung der NRM konstant bleibt.

2.6.1.2. Abhängigkeit vom Gestein

Die Eignung der Bohrkerne für die paläomagnetische Orientierung kann man bereits megaskopisch in groben Zügen einschätzen. In Gesteinen mit einer DRM ist die Korngröße der entscheidende Faktor für die Orientierbarkeit der Bohrkerne. 90 % der untersuchten Ton- und Siltsteine haben eine homogene bis nahezu homogene Remanenz mit α_{95} zwischen 3 und 13°, bei einem arithmetischen Mittel von 8,1° (Abb. 8a). Alle Sandsteine weisen dagegen eine wenig homogene bzw. inhomogene Remanenz mit α_{95} zwischen 15 und 78° auf und sind deshalb paläomagnetisch nicht orientierbar. Die Homogenität der Remanenz hängt in den bearbeiteten Sedimentiten mit einer CRM nicht von der Korngröße ab (Abb. 8b). Bei 90 % der Kerne liegt α_{95} zwischen 1 und 10°, im arithmetischen Mittel bei 4,5°. Die Homogenität der Remanenz ist demnach in Gesteinen mit einer CRM deutlich größer als in solchen mit einer DRM; folglich sind Gesteine mit einer CRM genauer zu orientieren als solche mit einer DRM.

Im untersuchten Probenmaterial besteht eine direkte Beziehung zwischen der Farbe des Gesteins und der Art seiner charakteristischen Remanenz. Alle grauen Proben tragen entsprechend den Entmagnetisierungskurven eine DRM, alle roten eine CRM. Die Kerne mit bräunlichen Tönen haben z.T. eine DRM, z.T. eine CRM.

Das arithmetische Mittel der Intensität der Remanenz in Proben mit einer DRM ist 1,8 nT (Nano-Tesla), wobei 60 % der Proben eine Intensität zwischen 0 und 1 nT haben. Proben mit einer CRM weisen eine mittlere Intensität von 26,1 nT auf; dabei liegen 83 % der Intensitäten im Bereich zwischen 5 und 45 nT. Die Intensität der Remanenz zeigt keine Abhängigkeit von der Korngröße der Sedimentite. Das gilt nicht nur für Gesteine mit einer CRM, sondern auch für die mit einer DRM. Ebensowenig besteht eine Beziehung zwischen der Intensität und der Homogenität (α_{95}) der Remanenz. Deshalb spielt die Intensität der Remanenz, sofern sie nicht im Meßfehler des Rockgenerators liegt, für die paläomagnetische Bohrkernorientierung keine Rolle.

Entsprechend den oben angeführten Fakten konnten in 90 % der Fälle die grauen Ton- und Siltsteine mit einer DRM sowie 90 % der roten Proben paläomagnetisch orientiert werden.

2.6.1.3. Polarität

In den untersuchten paläozoischen Sedimentiten treten bei der Bestimmung der Polarität Schwierigkeiten auf. Einmal ist die Inklination der Proben oft so klein, daß ihr Vorzeichen nicht eindeutig festgelegt werden kann, und zweitens ist wegen der äquatornahen Paläolage des Untersuchungsgebietes oft unklar, auf welcher der beiden Paläohalbkugeln das Gebiet zur Bildungszeit der charakteristischen Remanenz lag. Die Polarität der Proben ist jedoch bestimmbar, wenn die Polwanderungskurve bekannt ist und die Schichteffallrichtung der untersuchten Proben (und damit die Richtung der Deklination im Paläogradnetz) festliegt. Die erste Voraussetzung ist erfüllt und die zweite in der Regel ebenfalls, da anhand der Bohrlochabtauchrichtung (s. 3.2.1.) in den meisten Fällen entschieden werden kann, welche der beiden möglichen, paläomagnetisch ermittelten Schichteffallrichtungen die richtige ist.

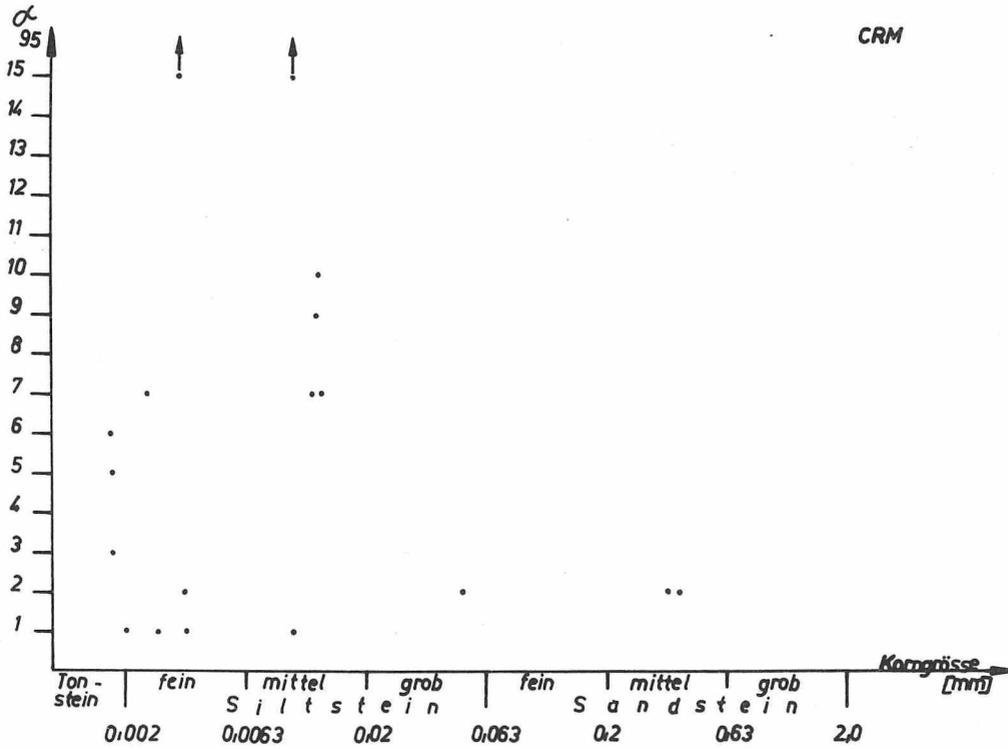
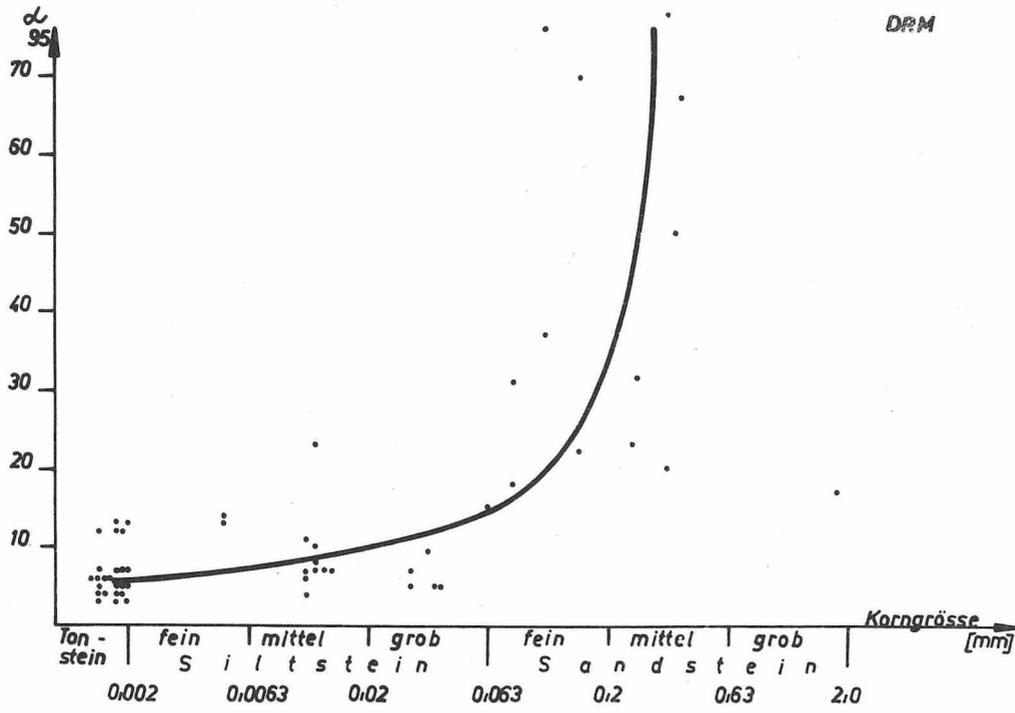


Abb. 8 Die Homogenität der Remanenz (α_{95}) in Abhängigkeit von der Korngröße.

Weist die Deklination in Richtung des Paläonordpols, so sind die Proben entsprechend dem Dipolmodell einer homogen magnetisierten Kugel (IRVING 1964, S. 43) normal magnetisiert. Mit Hilfe der Deklination kann man deshalb die Polarität der Proben und bei eindeutigen Vorzeichen der Inklination zusätzlich auch die Paläolage des Untersuchungsgebietes nördlich oder südlich des Äquators bestimmen (s. Tab. 4). In 7 der 11 Bohrungen kann die Polarität fehlerfrei festgelegt werden; in den restlichen vier Bohrungen ist dies infolge der geringen Probenzahl oder der nicht sicher bekannten Schichteinfallrichtung nicht möglich.

Tab. 4. Die Beziehung zwischen Deklination, Inklination, Polarität und Paläobreite

| Deklination gerichtet zum | Inklination | Paläoposition des Gebietes | Polarität |
|---------------------------|-------------|----------------------------|-----------|
| Paläonordpol | 0° | am Äquator | normal |
| | + | nördl. d. Äquators | |
| | - | südl. d. Äquators | |
| Paläosüdpol | 0° | am Äquator | invers |
| | - | nördl. d. Äquators | |
| | + | südl. d. Äquators | |

Die ordovizischen Proben (Bhg. IV) sind normal polarisiert (Tab. 5). Für die devonischen Gesteine (Bhg. II) kann die Polarität nicht bestimmt werden, da die Schicht-einfallrichtung der paläomagnetisch bearbeiteten Proben nicht eindeutig festliegt. Das karbonische Kernmaterial ist in vier Bohrungen invers und in einer normal magnetisiert. Das stimmt mit den Untersuchungen von APARIN & VLASOV (1965) überein, die feststellten, daß im Jungpaläozoikum die Zonen mit inverser Polarität eine große Dauer gegenüber denen mit normaler Polarität hatten. Die Polarität der permischen Proben (Bhg. VI) kann infolge der geringen Probenzahl nicht sicher bestimmt werden.

Tab. 5. Die Polarität der Proben und die paläogeographische Breite der Norddeutsch-Polnischen Senke, abgeleitet aus der Remanenz der Bohrkerne

| Alter d. charakteristischen Remanenz | Bhg.Nr. | Inklination [%] | | Deklination nach paläogeographisch | Polarität | Lagebeziehung zum Paläoäquator |
|--------------------------------------|---------|-----------------|------|------------------------------------|-----------|--------------------------------|
| | | pos. | neg. | | | |
| Cs | I | 100 | - | S | invers | 0 - 15 S |
| D | II | 100 | - | ? | ? | ? |
| Cs | III | 100 | - | N | normal | nördlich |
| O | IV | 100 | - | N | normal | nördlich |
| Cd | V | 100 | - | S | invers | südlich |
| P1 | VI | 80 | 20 | N? | normal? | nördlich |
| Cd | VII | 100 | - | S | invers | südlich |
| Cs | VIII | - | 100 | S | invers | nördlich (am) |
| Cd | IX | 25 | 75 | N? | normal? | nahe |
| Cd | X | (100) | - | ? | ? | nahe |
| Cs | XI | 50 | 50 | S | invers | am |

Aus der Richtung der charakteristischen Remanenz und der Inklination der untersuchten Proben ergibt sich folgende Paläolage des Gebietes der jetzigen Norddeutsch-Polnischen Senke: Im Ordovizium befand es sich entsprechend den Angaben der einen untersuchten Bohrung auf der Nordhalbkugel. Für das Devon ist keine Aussage möglich. Die Old-Red-Sedimente, die vorwiegend kalkig-mergelige Sedimentation und u.a. die Untersuchungen von CHLUPAC & KRS (1967) sowie IRVING (1964) lassen jedoch auf eine äquatornahe Lage des Untersuchungsgebietes schließen. Während des Dinants lag das Gebiet der Norddeutsch-Polnischen Senke in der Nähe bzw. südlich des Äquators, im Silies ebenfalls am Äquator, jedoch insgesamt nördlicher als im Dinant. Die paläogeographische Breite des Untersuchungsgebietes nördlich vom Äquator während des Perms ist zwar nicht mit Hilfe der untersuchten Proben, wohl aber anhand der Lage des mittleren permischen Paläopols sicher. Das stratigraphische Spektrum und die Zahl der bearbeiteten Proben reichen nicht aus, um eine Breitenverschiebungskurve für die Norddeutsch-Polnische Senke zu konstruieren. Ausführliche Angaben zu dieser Problematik findet man u.a. bei IRVING (1964) und ROTHER (1971).

2.6.1.4. Magnetisch wirksame Minerale

Aus den 11 untersuchten Bohrungen wurden 27 Proben mittels einer röntgenographischen Übersichtsanalyse auf Hämatit, Magnetit, Siderit, Ilmenit, Pyrit, Goethit und Lepidokrokit untersucht. Mit Hilfe dieser Übersichtsanalyse, die qualitative und nur bedingt quantitative Aussagen zum Mineralgehalt gestattet, wurden Hämatit, Siderit und Pyrit nachgewiesen.

In allen Proben mit rötlichen bis bräunlichen Farbtönen ist Hämatit enthalten. Er ist für die in den meisten Fällen starke und homogene Remanenz der Proben verantwortlich. Auch BUREK (1969), COLLINSON (1968, 1969), KRS (1967a), ROTHER (1971), ROY & PARK (1972), VLASOV & KOVALENKO (1963) und CORNWELL (1967) stellten in rotfarbenen Sedimenten übereinstimmend Hämatit als Träger der Remanenz (CRM) fest. COLLINSON (1969) kam zu dem Schluß, daß sich mit einem größeren Gehalt an dreiwertigem Eisen auch die Intensität der NRM erhöht, wenn die Tendenz auch nicht deutlich ist. In den hier untersuchten Proben zeigt sich, daß sich die Intensität der Remanenz unabhängig von der Korngröße des Sediments mit zunehmendem Hämatitgehalt erhöht. Siderit kommt bis auf eine Ausnahme ausschließlich in hämatithaltigen Proben vor. Es ist keine Beziehung zwischen den relativen Sideritgehalten und der Intensität der Remanenz festzustellen. Nach COLLINSON (1968) können jedoch auch Siderit, Tonminerale und Biotit zu den magnetischen Eigenschaften von Sedimenten beisteuern.

Zum Nachweis von Magnetit bzw. Titanomagnetiten ist die verwendete Analysenmethode wahrscheinlich nicht geeignet, denn in einigen Proben wurden trotz einer relativ starken Remanenz keine ferrimagnetischen bzw. antiferromagnetischen Minerale nachgewiesen.

In den Proben der Bohrungen V, VII und IX konnte als magnetisch wirksames Mineral nur Pyrit festgestellt werden. An ihn ist in den Bohrungen V und VII eventuell die hohe Inklination der Remanenz geknüpft. Diese hohe Inklination deutet auf eine postpaläozoische Entstehung der CARM hin. Ein solches Alter der CARM ist möglich,

da sich der Pyrit sowohl syn- als auch postgenetisch bilden kann. Gegen eine postpaläozoische Remagnetisierung spricht jedoch, daß die paläomagnetisch ermittelten Schichteinfallrichtungen mit den nach den anderen Orientierungsverfahren ermittelten Ergebnissen übereinstimmen. Eine eindeutige Aussage über den Anteil des Pyrits an der Remanenz und die Ursachen der hohen Inklination kann erst nach der Untersuchung weiterer Proben gemacht werden.

2.6.2. Einflüsse auf die Remanenz der Bohrkerne

2.6.2.1. Posttektonische Remagnetisierung

Das Sediment und seine CARM sind nicht immer altersgleich, weil einige Sedimente im Laufe ihrer Geschichte remagnetisiert wurden. Unter Remagnetisierung versteht man die Zerstörung der primären und die Anlage einer neuen CARM, in unserem Falle einer CRM. In den untersuchten Proben mit einer CRM ist deshalb die Frage zu klären, wann diese entstand. Das ist in zweierlei Hinsicht wichtig:

1. weil sich der Paläomeridian im Zeitraum Sedimentation - Remagnetisierung verschoben haben kann,
2. weil in einem vor der Remagnetisierung gekippten bzw. verfalteten Schichtkomplex die horizontale Komponente des Paläofeldes nicht in der Schichtfläche fixiert ist, sondern in der Horizontalen liegt.

Entsprechend der Remagnetisierungshypothese (CREER 1968) wurden zahlreiche präpermische Gesteine Eurasiens während des Perm remagnetisiert. Nach STORETVEDT (1971) sind Remagnetisierungen vor allem in Formationen verbreitet, die in mittleren bis niederen Paläobreiten entstanden und dort längere Zeit nahe der Erdoberfläche lagen. In diesen Formationen konnte sich im oxydierenden Milieu einer Paläoverwitterungskruste eine CRM bilden.

Das untersuchte paläozoische Kernmaterial wurde zum größten Teil relativ äquatornah abgelagert. Deshalb ist eine teilweise Remagnetisierung in ihm durchaus möglich. Für die Altersfrage der CRM der bearbeiteten Kerne ist demnach entscheidend, bis zu welchem Zeitpunkt ein oxydierendes Medium von der Erdoberfläche aus in die beprobten Bereiche des Präzechsteins eindringen konnte. Die untersuchten jungpaläozoischen Sedimente der Norddeutsch-Polnischen Senke wurden bald nach ihrer Ablagerung mit Rotliegend-Vulkaniten oder/und Zechsteinsalzen oder/und mächtigen Sedimenten überdeckt. Infolgedessen kann die CRM in den untersuchten Bohrkerne nur syngenetisch oder im Zeitraum zwischen Sedimentation und Zechstein entstanden sein. Die Richtung des Paläomeridians verschob sich vom Ordovizium bis zum Perm um ca. 21° von NE nach NNE (Tab. 3). Diese 21° sind bei einer nichterkannten Remagnetisierung im Untersuchungsmaterial der maximale Orientierungsfehler infolge einer falschen Paläomeridianrichtung.

Ob die CRM eines Schichtkomplexes vor oder nach der tektonischen Beanspruchung erworben wurde, läßt sich in unterschiedlich stark einfallenden Schichten prüfen. Der Faltungstest von GRAHAM (1949) ist in seiner traditionellen Form jedoch dafür bei unorientierten Bohrkerne nicht geeignet, da weder die Lage der Falten- bzw. Kippachse im Anstehenden noch das wahre Schichteinfallen bekannt sind. Wurde die

CRM syngenetisch erworben, so liegt die horizontale Komponente des Paläomagnetfeldes in der Schichtfläche (unter Voraussetzung einer horizontalen Sedimentationsfläche). Orientiert zur Schichtfläche herausgesägte Proben zeigen dann trotz unterschiedlichen Einfallens dieselbe Remanenzrichtung. Entstand die CRM nach einer Schollenkipfung oder Faltung, so ist die schichtflächenparallele Remanenzrichtung im Bohrkern nicht mit der Richtung der horizontalen Komponente des Paläomagnetfeldes identisch, und mit dem Schichteinfallen verändert sich auch die Remanenzrichtung der Bohrkernkerne.

Um die zur paläomagnetischen Kernorientierung benötigte Richtung der horizontalen Komponente des Paläomagnetfeldes im Bohrkern zu ermitteln, wendet man die Neigungskorrektur an (s. 2.5.3.). Eine posttektonische Remagnetisierung ist in unterschiedlich stark einfallenden Schichten dann daran zu erkennen, daß die Remanenzvektoren der Kernproben nach der Neigungskorrektur weniger variieren als davor. Unterscheidet sich das Fallen der Proben wenig, so verändert sich die Variation zwischen ihren Remanenzrichtungen vor und nach der Neigungskorrektur nur gering. In diesem Falle ist es schwierig, zu entscheiden, ob die CRM vor oder nach der tektonischen Beanspruchung erworben wurde (Bhg. VIII) (s. 4.2.3.). - In einem geneigten bzw. gefalteten Schichtkomplex mit einer posttektonischen CRM wird die mittlere Deklination der Proben nach der Neigungskorrektur zur Kernorientierung benutzt und entsprechend der Paläomeridianrichtung zur Bildungszeit der CRM orientiert.

In schräggeschichteten Bereichen kann man feststellen, ob die CRM syn- oder post-sedimentär entstand. Zu diesem Zweck sägt man aus verschiedenen stark einfallenden Laminen einer Schrägschichtungsserie mehrere Würfel parallel zueinander aus dem Bohrkern heraus. Zeigen alle Würfel dieselbe Remanenzrichtung, wie dies in Probe 110 ($\alpha_{95} = 2^{\circ}$) der Fall ist, so entstand die CRM nach der Sedimentation.

2.6.2.2. Bohrprozeß, Erdfeld, Versenkungstiefe

Neben den charakteristischen Remanenzen DRM und CRM können in den bearbeiteten Proben noch folgende uncharakteristische Magnetisierungskomponenten enthalten sein:

- eine IRM, die infolge des Bohrprozesses entstand und in Abtauchrichtung der Bohrung orientiert ist,
- eine IRM, die durch die säkulare Wirkung des rezenten Erdmagnetfeldes gebildet wurde und diesem parallel gerichtet ist, d.h., die Inklination ist in unserem Gebiet ca. 70° ,
- eine PRM, die in ungefalteten Sedimenten durch die Druckeinwirkung des überlagernden Gesteins und in gefalteten vor allem durch einaxialen Druck senkrecht zur Faltenachse verursacht wurde,
- eine erdfeldparallele PTRM, die infolge der Erwärmung des Gesteins in mehreren tausend Metern Teufe und der nachfolgenden Abkühlung beim Kernziehen entstand.

REICH (1941) vermutet, daß das Bohrgestänge, das man als langen Stabmagneten auffassen muß, wahrscheinlich einen erheblichen Einfluß auf die NRM hat. SUSTOV (1961) und PEREDERIN (1968) [beide in RZEVSKIJ & GAAS (1973)] sowie KIRILLOV & APARIN

(1970) konnten keine Beeinflussung der NRM des Kerns durch den Bohrprozeß feststellen. RŽEVSKIJ & GAAS (1973) dagegen meinen, daß durch den Bohrprozeß eine nach unten gerichtete IRM entsteht.

Im bearbeiteten Kernmaterial wird während der Entmagnetisierung die Inklination in positiven Proben kleiner und in negativen größer (Abb. 7c-f). Das beweist, daß die vertikale Komponente der uncharakteristischen Remanenz in unserer geographischen Position nach unten gerichtet ist. Es bleibt jedoch offen, ob diese Komponente infolge des Bohrprozesses oder infolge der Wirkung des rezenten Erdfeldes entstand.

Nach RŽEVSKIJ & GAAS (1973) hat die durch den Bohrprozeß hervorgerufene IRM auch eine in Drehrichtung des Bohrgestänges gerichtete horizontale Komponente. Trifft dies zu, so muß die Deklination der bearbeiteten Proben während der Entmagnetisierung gegen den Uhrzeigersinn drehen. Alle homogen magnetisierten, eindeutig Kopf-Krone-orientierten und eine deutliche Drehung der Deklination aufweisenden Proben mit einer DRM wurden unter diesem Gesichtspunkt untersucht. Bei 16 Proben dreht die Deklination gegen und bei 10 Proben im Uhrzeigersinn. In den bearbeiteten Proben gibt es demnach die nach RŽEVSKIJ & GAAS (1973) zu erwartende Rechtsdrehung der Deklination nicht und damit keine feststellbare Einwirkung des Bohrprozesses auf die Deklination der Proben.

Beim Heraustrennen von Würfeln aus Bohrkernen mit kleinem Volumen läßt es sich zuweilen nicht vermeiden, daß ein Würfel wegen der Materialknappheit unvollständig bleibt. Die Oberfläche einiger untersuchter Würfel besteht deshalb zu einem geringen Teil aus Bohrkernwand. Diese stand beim Kern in direktem Kontakt mit dem magnetisch wirksamen Kernmeißel. Wie ein Vergleich der Remanenz von solchen unvollständigen Würfeln mit Würfeln aus dem Kerninnern derselben Proben zeigt, haben die Würfel die gleiche Remanenzrichtung. Infolgedessen besteht keine laterale Veränderung der Remanenz im Bohrkern. Das beweist, daß der Abrieb des Bohrgestänges die Remanenz der Bohrkern nicht nachweislich beeinflusst.

Ist die gesamte uncharakteristische Remanenz eine bohrlochachsenparallele IRM, die infolge des Bohrprozesses induziert wurde, so darf sich nach der Neigungskorrektur, mit deren Hilfe die NRM aus dem schichtflächenbezogenen in ein bohrlochachsenbezogenes Koordinatensystem transformiert wird, bei der Entmagnetisierung theoretisch nur die Inklination verändern; auf jeden Fall muß die Drehung der Deklination nach der Korrektur kleiner sein als davor. Von den neigungskorrigierten Proben sind 20 aussagekräftig in bezug auf die Veränderung der Deklination vor und nach der Neigungskorrektur. In 16 Proben ändert sich die Deklination bei der Entmagnetisierung weniger und bei 4 Proben stärker als vor der Neigungskorrektur. Diese geringere Veränderlichkeit der Deklination nach der Neigungskorrektur beweist, daß ein großer Teil der uncharakteristischen NRM der untersuchten Proben nahe der bzw. in Bohrlochabtauchrichtung liegt.

Die untersuchten Proben stammen aus Teufen zwischen 1000 und 7000 m. Bei einer geothermischen Tiefenstufe von $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ sind die meisten Gesteine also Temperaturen zwischen minimal 30 und ca. 210°C ausgesetzt gewesen. Diese und auch noch etwas höhere Temperaturen liegen unterhalb der CURIE-Temperatur der ferri- und antiferromagnetischen Minerale und erzeugen im Gestein im Zusammenwirken mit dem Erdfeld eine

PTRM, deren Richtung derjenigen des Erdfeldes zu jener Zeit entspricht, als das Gestein am stärksten erwärmt war. Da sich die Norddeutsch-Polnische Senke seit dem Paläozoikum vorwiegend in Absenkung befindet, wird die Richtung der PTRM in den bearbeiteten Proben in der Mehrzahl der Fälle eine känozoische sein und der rezenten Erdfeldrichtung nahekommen. Wie bereits erwähnt, ist die PTRM physikalisch stabiler als IRM und PRM, aber diesen bei der Entmagnetisierung so ähnlich, daß diese drei Komponenten nicht voneinander zu trennen sind. Deshalb kann über den Anteil der PTRM an der Remanenz der Bohrkerne keine Aussage gemacht werden.

Eine Beanspruchung der Gesteine durch einaxialen Druck wirkt sich auf ihre NRM aus. Da dieser Einfluß anhand des untersuchten Kernmaterials nicht klar einzuschätzen ist, stützen sich die folgenden Ausführungen auf Ergebnisse aus der Literatur. Solange ein Gestein elastisch verformt wird, ist der Prozeß der Magnetisierung unter Druck reversibel, sonst irreversibel (STACEY 1958). In letzterem Falle erwirbt das Gestein eine piezoremanente Magnetisierung (PRM) (NAGATA 1970). Eine zweite Druckbeeinflussung verändert die Gesteine nicht weiter, sofern der zuvor angelegte Druck nicht überschritten wird (VADKOVSKIJ 1965; KEAN & FULLER 1971). Die NRM eines Gesteins nimmt unter zunehmendem einaxialem Druck längs der Achse der Druckspannung ab und senkrecht zu dieser Achse zu (STACEY 1958; VLASOV & KOVALENKO 1965; NAGATA 1970). In tief versenkten Gesteinen muß die vertikale Komponente der NRM infolge des Drucks der überlagernden Gesteine deshalb kleiner sein als zur Zeit der Gesteinsgenese, während sich die Richtung der horizontalen Komponente der NRM infolge des Überlagerungsdruckes nicht merklich verändert (TRETJAK 1965), wohl aber deren Intensität. Die paläomagnetische Bohrkernorientierung kann demnach in germanotyp beanspruchten Gesteinen durch den Überlagerungsdruck nicht beeinflußt werden. Dementsprechend ist in den 11 untersuchten Bohrungen auch keine Abhängigkeit der Genauigkeit der paläomagnetischen Bohrkernorientierung von der Tiefe festzustellen.

STACEY (1958) schätzt, daß die remanenten Momente bei linearer Kompression um ca. 0,05 % je Atmosphäre wechseln, wobei die Beeinflussung der NRM von der Korngröße und der Morphologie der Titanomagnetite abhängig ist (KEAN & FULLER 1971). HARGRAVES & PERKINS (1969) untersuchten Gesteine, die durch einen Meteoreinschlag (Arizona) bzw. eine Atomexplosion (Nevada) beansprucht wurden. Sie stellten fest, daß Intensität und Orientierung der NRM in geschockten und ungeschockten Gesteinen nach einer Entmagnetisierung bei 500 Oe wieder zusammenfielen. Die stabile Komponente der NRM wurde demnach durch den Schock anscheinend nicht beeinflußt. Die Einwirkung von einaxialem Druck sollte deshalb auch in Bohrkernen mit Hilfe der Entmagnetisierung zu eliminieren sein.

Bei horizontalem Streß senkrecht zur Faltenachse müßte bei der hier angewendeten Beprobungsweise und einer Verkleinerung der NRM-Komponente, die parallel zur Druckrichtung liegt, die J_y -Komponente konstant bleiben. Das Verhältnis der Komponenten J_x und J_z würde sich dann je nach der Größe des Schichteinfallens verändern, und deshalb müßte die Deklination bei der Entmagnetisierung infolge der Zerstörung der PRM drehen. Die drei untersuchten, prätektonisch homogen magnetisierten Proben mit einer DRM (Bhg. III) reichen nicht aus, um diese Hypothese zu prüfen. Infolgedessen kann der Einfluß der Faltung auf die paläomagnetische Orientierung von Bohrkernen mit einer prätektonisch entstandenen charakteristischen Remanenz z.Z. nicht eingeschätzt werden.

Die möglicherweise in den Bohrkernen enthaltenen vier Komponenten der uncharakteristischen Remanenz (erdfeldbedingte IRM, bohrprozeßbedingte IRM, PRM und PTRM) sind ähnlich gerichtet. Sie werden bei der Entmagnetisierung mehr oder weniger parallel zerstört, obwohl die PTRM nach ANGENHEISTER & SOFFEL (1972) etwas stabiler ist als IRM und PRM. Anhand der vorliegenden Meßergebnisse war es deshalb nicht möglich, die uncharakteristischen Komponenten der Remanenz mit Hilfe der Entmagnetisierungskurven bzw. der Dm/Im-Stereogramme zu trennen. Infolgedessen ist auch keine Aussage über ihre einzelnen Anteile an der Gesamtremanenz zu machen, und die UCARM kann hier nur als Einheit betrachtet werden.

Außer in den grauen Sandsteinen gelang es im Untersuchungsmaterial stets, die uncharakteristische Remanenz mit Hilfe der Entmagnetisierung weitgehend zu zerstören und die charakteristische zu isolieren. Demzufolge beeinflussen der Bohrprozeß, das rezente Erdfeld und die Versenkungstiefe die paläomagnetische Bohrkernorientierung nicht.

2.6.2.3. Säkularvariation

Als Ausdruck der Säkularvariation veränderte sich in Mitteleuropa im Zeitraum von 1950 bis 1970 die Deklination zwischen 1 und $1,5^{\circ}$ und die Inklination um gut 1° (MUNDT 1973). BUCHA (1964) berechnete für gleichmäßig über die Erde verteilte Orte die theoretischen rezenten Polpositionen, die sich entsprechend der heutigen Konfiguration des Erdfeldes und des Dipolmodells ergeben. Diese Polpositionen liegen in einem Kreis mit einem Radius von 2500 km! BUCHA (1964) kam deshalb zu dem Schluß, daß in Extremfällen Differenzen von 20 bis 30° zwischen paläomagnetischen Daten als Folge der Inhomogenität des Erdfeldes entstehen können. MACKERETH (1971) fand bei der Untersuchung rezenter Sedimente, daß die Richtung der horizontalen Komponente der Remanenz (D) um eine mittlere Richtung mit einer Amplitude von 20° und einer Frequenz von 2700 Jahren oszilliert. Da die Säkularvariation Perioden von 10^3 bis 10^4 Jahren hat, hängt die Variation der NRM-Richtungen in Sedimenten somit von der Sedimentationsrate ab (OPDYKE & HENRY 1969; HARRISON 1973). Je geringer die Sedimentationsrate war, um so längere Perioden sind in einer Probe gemittelt, und desto geringer ist der Einfluß der Säkularvariation.

Bei einer kleinen Sedimentationsrate heben sich kurzzeitige Abweichungen vom Normalfeld in einer Probe auf. Deshalb weicht die Remanenzrichtung in einer Probe nur infolge von Langzeitvariationen von der mittleren Paläofeldrichtung ab und erreicht nie solche hohen Werte, wie sie von BUCHA (1964) theoretisch ermittelt wurden. Außerdem werden infolge der Alterung der Gesteine und der magnetischen Wechselwirkung zwischen ihren Partikeln magnetische Momente, die von der mittleren Remanenzrichtung abweichen, wahrscheinlich zum großen Teil in die magnetische Vorzugsrichtung umorientiert. Der Einfluß der Säkularvariation auf die paläomagnetische Kernorientierung wird weitgehend ausgeschaltet, wenn man die langsamer sedimentierten Tonsteine den während eines kürzeren Zeitraumes abgelagerten Sandsteinen bei der Beprobung vorzieht.

Die Ergebnisse aus den hier untersuchten Bohrungen zeigen, daß die Säkularvariation auf die Orientierung paläozoischer Bohrkerne keinen sehr starken Einfluß ausüben kann. Die mittleren schichtflächenparallelen Remanenzrichtungen der 5 ordovizischen Proben der Bohrung IV, die über einen Teufenbereich von 1000 m verteilt sind, differieren nur um 29° . Die schichtflächenparallelen Remanenzrichtungen der 8 silesischen Proben aus der Bohrung XI (größte Teufendifferenz knapp 2300 m) variieren um max. 43° . Diese Differenzen sind zumindest zum Teil auf die schwankende Schichteinfallrichtung zurückzuführen und resultieren sicher nicht vollständig aus der Säkularvariation.

2.6.2.4. Feldinversion

Das Erdmagnetfeld hat seine Polarität während der Erdgeschichte oftmals gewechselt. Bei einem Polaritätswechsel invertiert das geomagnetische Hauptfeld in einem Zeitraum von wenigen tausend Jahren, wobei seine Intensität geringer wird, es seinen Dipolcharakter aber beibehält (COX & OPDYKE 1971; STEINHAUSER & VINCENZ 1973; OPDYKE, KENT & LOWRIE 1973). NAGATA & KONO (1970) untersuchten vier Feldinversionen und kamen zu dem Schluß, daß die Polaritätswechsel des geomagnetischen Hauptfeldes in einer sehr kurzen Zeit vor sich gegangen sein müssen. Nach LARSON, WATSON & JENNINGS (1971) beträgt die Zeit eines Polaritätsübergangs (transition) mindestens 3000 Jahre. OPDYKE, KENT & LOWRIE (1973) ermittelten für einen Polaritätsübergang eine Dauer von annähernd 4600 Jahren, und nach COX (1969) fand in den letzten $4,5 \cdot 10^6$ Jahren im Durchschnitt alle 180 000 Jahre eine Feldinversion statt (einschließlich events, ohne excursions). - Die Dauer eines Polaritätswechsels ist also sehr kurz gegenüber der Zeit, während deren das Dipolfeld seine normale Lage einnimmt (s. Abb. 9). Entsprechend gering ist die Wahrscheinlichkeit, eine Probe gerade aus einem Bereich zu entnehmen, der während eines Polaritätsüberganges abgelagert wurde. Demzufolge wird die paläomagnetische Bohrkernorientierung durch Polaritätsübergänge bei ausreichender Probenzahl nicht beeinflusst.

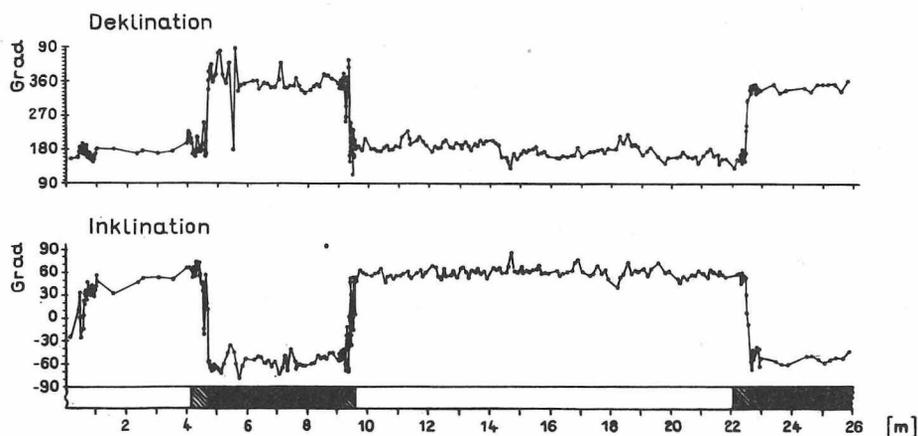


Abb. 9 Polaritätswechsel (transitions) in einem Tiefseekern [aus OPDYKE, KENT & LOWRIE (1973)]

Proben mit einer Blitzschlagmagnetisierung können paläomagnetisch nicht orientiert werden, da dort die Magnetisierungsrichtung im Gestein unabhängig von der Erdfeldrichtung entstand.

2.6.2.5. Probenbearbeitung

Wie SCHMUCKER (1957) nachweisen konnte, hat der Schneidvorgang, mit dem die Würfel aus dem Bohrkern herausgetrennt werden, keinen Einfluß auf die NRM. Das Zusammenkleben zerbrochener Würfel zeigt ebenfalls keine merkbare Wirkung auf deren Remanenz, denn auch nach mehrmaligem Kleben waren in den untersuchten Proben (Bohrungen I, III, VII) Richtung und Intensität der Remanenz noch dieselben wie vor dem Zerfall der Würfel.

Die Komponenten der Remanenz J_x , J_y und J_z , die man für die Orientierung jeder Probe ermittelt (Abb. 3), werden infolge einer unregelmäßigen Probenform, von Instrumentenfehlern (u.a. Eichung) und eines zu groß gewählten Meßbereiches ungenau gemessen.

Die Mehrzahl der untersuchten Würfel hat eine Winkeltoleranz von $0 - 1(2)^\circ$ und eine Längentoleranz bis 0,2 mm. Daraus ergibt sich eine maximale Winkelungenauigkeit der Remanenz infolge der unregelmäßigen Probenform von 2° .

Nach JELINEK (1966) ist der Intensitätsfehler des mit Hilfe des Rockgenerators gemessenen Remanenzvektors, grob geschätzt, 2 %. Der Winkelfehler ist bei vorschriftsmäßiger Eichung kleiner als 1° . VLASOV & KOVALENKO (1963) benutzten ein astatisches Magnetometer, das weniger empfindlich ist als der benutzte Rockgenerator, und berechneten einen mittleren quadratischen Richtungsfehler von 3° . AUSTER & WAGNER (1965) geben für ihren Rockgenerator eine maximale Richtungsabweichung von 5° und BÉRSET (1968) eine solche von $0,5^\circ$ bei homogen magnetisierten Proben an.

Die Toleranz des Meßgerätes ist über die gesamte Skalenbreite gleich. Nahe dem Nullpunkt abgelesene Werte sind deshalb gegenüber dem absoluten Betrag der NRM relativ ungenauer als weiter vom Nullpunkt entfernt abgelesene. Aus diesem Grunde sollte man stets im größtmöglichen Meßbereich arbeiten.

Die Variation der Remanenzrichtungen zwischen Würfeln einer Probe ist im Untersuchungsmaterial oft so groß, daß sie nicht aus der Probenform und/oder Meßfehlern resultieren kann. Abweichende NRM-Richtungen zwischen den Würfeln einer Probe spiegeln deshalb in erster Linie die natürliche Inhomogenität der Remanenz wider. Wie die Variation der Remanenzrichtungen homogen magnetisierter Proben zeigt, übersteigt die Summe der Meß- und Bearbeitungsfehler nur in Ausnahmefällen 5° und ist in der Regel kleiner als 3° . Diese Fehler bleiben geringfügig, weil die Würfel in 6 Lagen gemessen werden und man die Beträge der Komponenten J_x , J_y und J_z jeweils aus 4 Meßwerten arithmetisch mittelt.

Die Entmagnetisierung im Wechselfeld bzw. auf thermischem Wege ergibt meist leicht voneinander abweichende Remanenzrichtungen (CHLUPAC & KRS 1967; KRS & TASLER 1968; TARLING, MITCHELL & SPALL 1973) oder sogar stark differierende (BUREK 1969). Die hier durchgeführte Wechselfeldentmagnetisierung hat den Vorteil, daß sie schneller und unkomplizierter zu handhaben ist als die thermische Entmagnetisierung und nicht wie diese unerwünschte chemische Veränderungen im Gestein bewirkt. Für rote Sedimente wird eine thermische Entmagnetisierung empfohlen (STORETVEDT 1971; CHLUPAC & KRS 1967). Die bei den Untersuchungen für die roten Bohrkern benutzte Wechselfeldentmagnetisierung ist berechtigt angewendet, weil

- rot- und graufarbene Proben in einer Bohrung (Bhg. IV, XI) übereinstimmend dieselbe Remanenzrichtung zeigen und
- das Alter der charakteristischen Remanenz der roten Kerne bekannt ist (s. 2.6.2.1.).

Beim Entmagnetisierungsprozeß kann sich in den Proben infolge der Verzerrung des Wechselfeldes eine anhysterese Magnetisierung bilden. Ein Anzeichen für ihre Induzierung ist die Erhöhung der Intensität der NRM trotz weiterer Entmagnetisierung (SNAPE 1971). Durch die Verwendung eines sinusförmigen Wechselfeldes mit harmonischer Wellenform (FRÖLICH & LÖFFLER 1967) kann bei biaxialer Probenrotation keine isothermale Magnetisierung (hierzu gehört auch die anhysterese) entstehen (RUNCORN 1967, S. 1280). Die benutzte Entmagnetisierungsanlage vereint diese Vorzüge. Mittels einer Entmagnetisierung in zwei Lagen und Abgleichung des Erdfeldes am Probenhalter war keine wesentliche Beeinflussung der NRM der Proben möglich.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die bei der Probenbearbeitung, der Messung des Remanenzvektors und der Entmagnetisierung entstehenden Winkelfehler nur in Ausnahmefällen 5° übersteigen, während sie im allgemeinen $0 - 3^{\circ}$ betragen.

2.6.3. Geometrische Einflüsse auf die Kernorientierung

2.6.3.1. Bohrlochabweichung (BA)

Als Bezugselement für paläomagnetische und weitere, z.B. klufttektonische Untersuchungen am unorientierten Bohrkern dient die Schichteinfalllineare (s. 2.1.1.). Abtauchwinkel und Abtauchrichtung der Einfalllineare im Anstehenden (EL) und der scheinbaren Einfalllineare am Bohrkern (sEL) können infolge der Bohrlochabweichung differieren. Bei den bisherigen Versuchen, Bohrkern mit Hilfe ihrer Magnetisierung zu orientieren, wurde dies nur unzureichend oder nicht berücksichtigt (LYNTON 1937; LEGAT 1957; KAGELS 1970). Infolge der Nichtberücksichtigung der BA können jedoch wesentliche Kernorientierungsfehler entstehen.

Das Einfallen am Kern kann maximal um den Betrag der Bohrlochneigung vom wahren Einfallen im Anstehenden abweichen; siehe dazu Abb. 10. Bei den dargestellten 4 Extremfällen liegt die Bohrlochachse in der senkrecht stehenden Ebene, die wie die wahre Einfalllineare streicht. Bei dieser Voraussetzung unterscheiden sich infolge der Bohrlochneigung nur die Einfallbeträge zwischen Kern und Anstehendem, nicht aber die Richtungen von EL und sEL. Liegt die Bohrlochachse nicht in der beschriebenen

Ebene, so sind die Richtungen der Einfalllinearen auf ein und derselben Schichtfläche im Anstehenden und am Kern verschieden (Abb. 11). Ein Abweichen des Einfallens am Kern vom wahren Einfallen (infolge der BA) ist für die paläomagnetische Kernorientierung ohne Belang, da man die Probenwürfel unabhängig vom Fallen schichtflächenparallel aus dem Bohrkern herausägt. Bei der angewendeten Beprobungsweise sind deshalb der Betrag der schichtflächenparallelen Remanenz sowie Richtung und Betrag der senkrecht zur Schichtfläche orientierten Inklination in Proben aus ein und demselben Sediment mit einer DRM (s. Abb. 3) stets gleich. Die Richtung der schichtflächenparallelen Remanenz hängt dagegen von der Festlegung der sEL am Bohrkern ab. Es kommt demnach nur darauf an, die infolge der BA möglicherweise entstandene Richtungsabweichung zwischen wahrer (EL) und scheinbarer Einfallene am Kern (sEL) zu ermitteln und zu eliminieren.

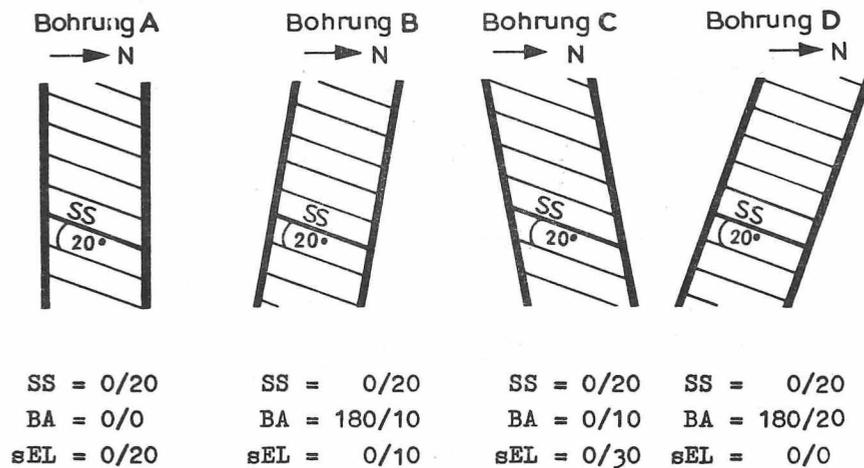


Abb. 10 Einfallen am Bohrkern in Abhängigkeit von der Bohrlochabtauchrichtung

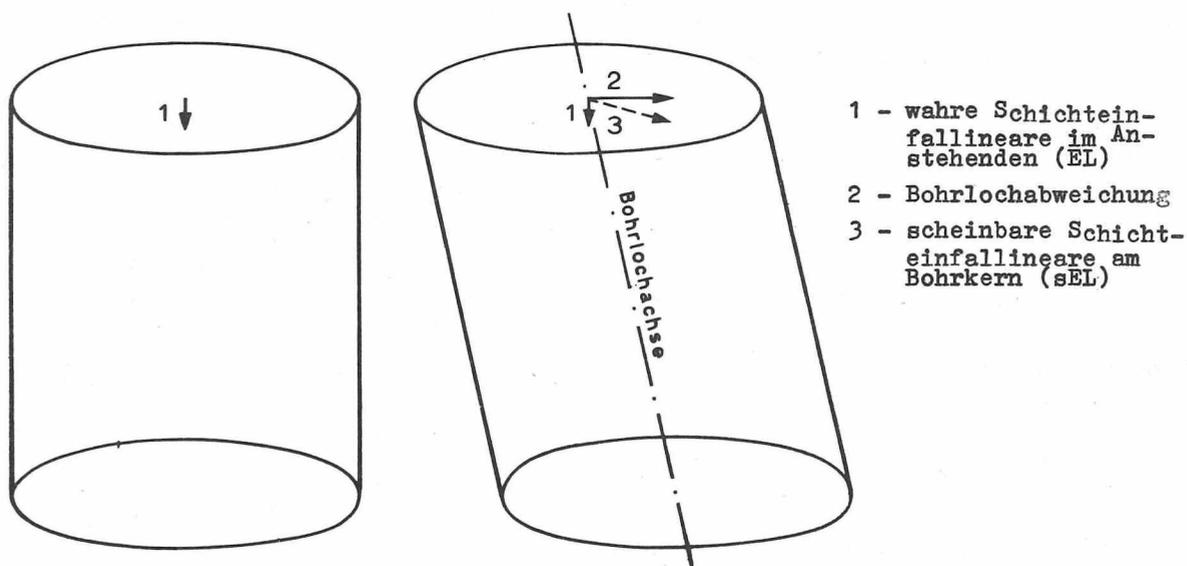


Abb. 11 Richtungsänderung der Schichteinfallene am Bohrkern infolge der Bohrlochabweichung

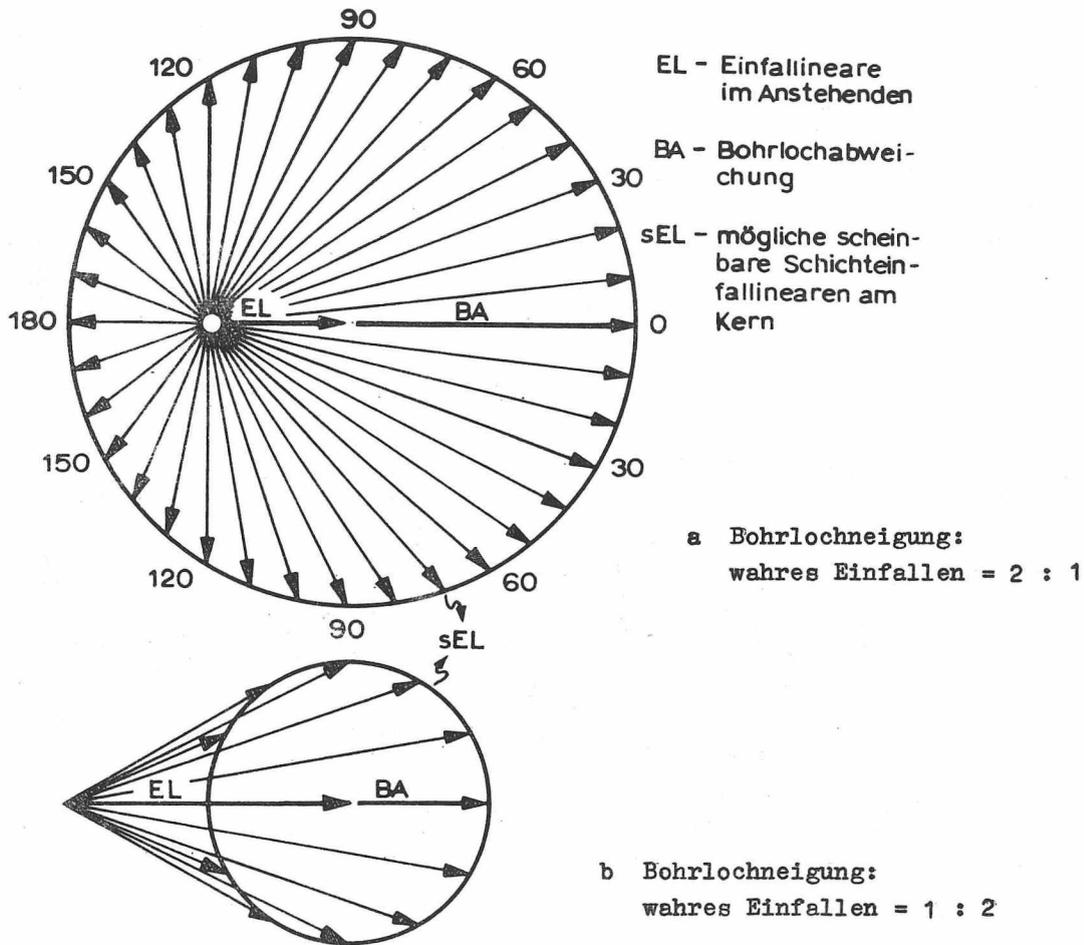


Abb. 12 Mögliche Abtauchrichtungen und Abtauchbeträge der scheinbaren Schichteinfalleneare am Kern

Ist die Bohrlochneigung größer als das wahre Einfallen, so kann die sEL je nach Bohrlochabtauchrichtung jede beliebige Lage am Bohrkerne einnehmen (Abb. 12a). Bei der Beprobung muß deshalb darauf geachtet werden, daß das Verhältnis der Bohrlochneigung zum wahren Einfallen möglichst erheblich kleiner als 1 ist. Je kleiner dieses Verhältnis wird, desto geringere Richtungsabweichungen zwischen EL und sEL sind möglich. Abb. 12b zeigt, daß die Azimutabweichung zwischen EL und sEL bei einem Verhältnis von Bohrlochneigung zu wahren Schichteinfallen wie 1 : 2 maximal 30° sein kann.

In den angeführten Beispielen wird jeweils das Verhältnis der Bohrlochneigung zum wahren Einfallen betrachtet. Wichtig aber ist eine quantitative Aussage über die maximale Richtungsabweichung zwischen sEL und EL ($\Delta\lambda$) in Abhängigkeit von der Bohrlochneigung und dem Einfallen am Kern. Diese Beziehung wurde auf graphischem Wege mit Hilfe von Diagrammen wie in Abb. 12 ermittelt und in Abb. 13 dargestellt. Auf der Abszisse ist die Bohrlochneigung aufgetragen. Die Kurven im Nomogramm entsprechen dem am Kern

gemessenen Einfallen. Aus diesen beiden bekannten Größen ergibt sich die maximale Richtungsabweichung $\Delta\lambda$ zwischen EL und sEL, die auf der Ordinate abgelesen wird. Sie entspricht dem maximalen Orientierungsfehler des Kerns infolge der BA. Die maximale Richtungsabweichung $\Delta\lambda$ läßt sich außerdem nach der Gleichung (18),

$$(18) \quad \Delta\lambda = \sin \frac{\text{Bohrlochneigung}}{\text{Einfallen am Kern}},$$

die empirisch aus dem Nomogramm in Abb. 13 abgeleitet wurde, berechnen. Tab. 6 gibt einige Beispiele für die Größe von $\Delta\lambda$ bei unterschiedlichen Verhältnissen der Bohrlochneigung zum scheinbaren Einfallen. Auch bei großer Bohrlochneigung können die Richtungen von EL und sEL übereinstimmen. Will man jedoch den Einfluß der BA auf die Kernorientierung sicher ausschließen, so müssen Proben mit einem kleinen Verhältnis der Bohrlochneigung zum Einfallen am Kern orientiert werden.

Tab. 6 Maximale Richtungsabweichung $\Delta\lambda$ zwischen der Schichteinfallene am Kern (sEL) und im Anstehenden (EL)

| Nr. Beisp. | Scheinbares Schichteinfallen am Kern | Bohrlochabweichung | Maximale Winkel-differenz EL - sEL |
|------------|--------------------------------------|--------------------|------------------------------------|
| 1 | 1 | 2 | 180° |
| 2 | 1 | 1 | 90° |
| 3 | 2 | 1 | 30° |
| 4 | 4 | 1 | 14,5° |
| 5 | 6 | 1 | 9,6° |
| 6 | 10 | 1 | 5,7° |
| 7 | 20 | 1 | 2,9° |

Der verfälschende Einfluß einer großen Bohrlochneigung auf die paläomagnetische Kernorientierung kann und muß eliminiert werden, wenn Bohrlochabtauch- und Schichteinfallrichtung nicht entgegengesetzt gerichtet sind. Anhand von Abb. 14 wird die von mir so benannte Bohrlochabweichungskorrektur erläutert. Taucht die wahre Einfallene (EL) z.B. mit 30/28 nach NNE ab und die Bohrlochachse mit 180/10 nach S, so erhält man am Kern ein Einfallen von 20°, und die sEL weist eine Azimutabweichung von 15° zur EL auf. Auf dem umgekehrten Wege sind nun mit Hilfe des dargestellten Parallelogramms aus der sEL (Azimut paläomagnetisch ermittelt, Einfallen am Kern gemessen) und der BA Azimut und Einfallen der EL zu bestimmen.

Eine Bohrlochabweichungskorrektur wurde in Bohrung I vorgenommen, wobei die EL nach der Korrektur bedeutend weniger variieren als zuvor die sEL. Das Verfahren darf man jedoch nicht vorbehaltlos anwenden. Ist z.B. bei einer großen Bohrlochneigung und einer konstanten Bohrlochabtauchrichtung die wahre Variation der EL mehrerer Bohrkerne im Anstehenden groß, so wird nach der Bohrlochabweichungskorrektur eine nicht vorhandene kleine Variation der EL vorgetäuscht. Die Bohrlochabweichungskorrektur ist deshalb nur in solchen Teufenbereichen am Platze, wo die Bohrlochachse nicht entgegengesetzt zur lokalen Einfallrichtung abtaucht. Solche Verhältnisse liegen wahrscheinlich vor, wenn eine teufenabhängige systematische Änderung der Richtungen von BA und sEL auftritt und die EL hier nach der Korrektur erheblich weniger streuen als zuvor die sEL.

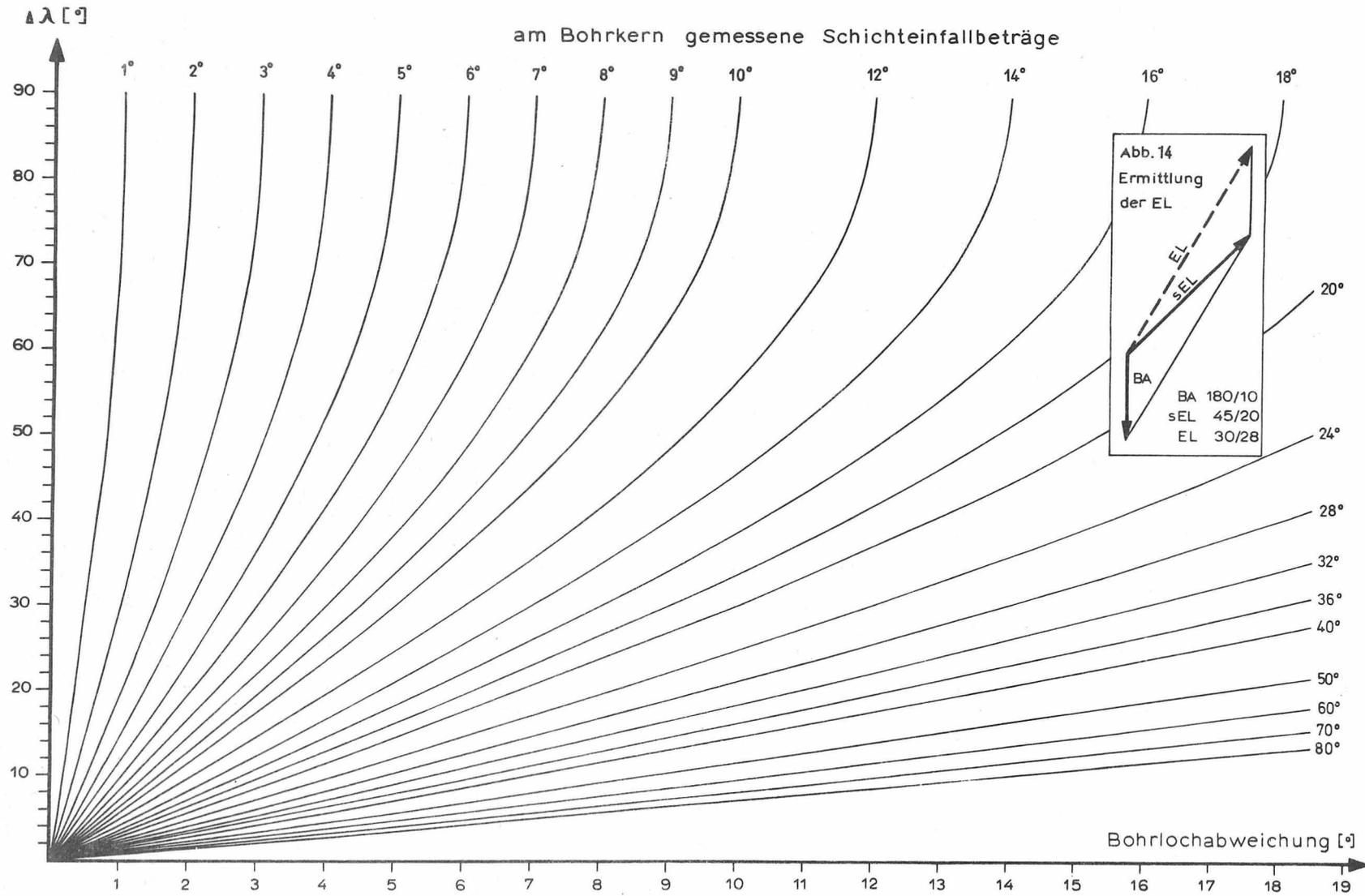
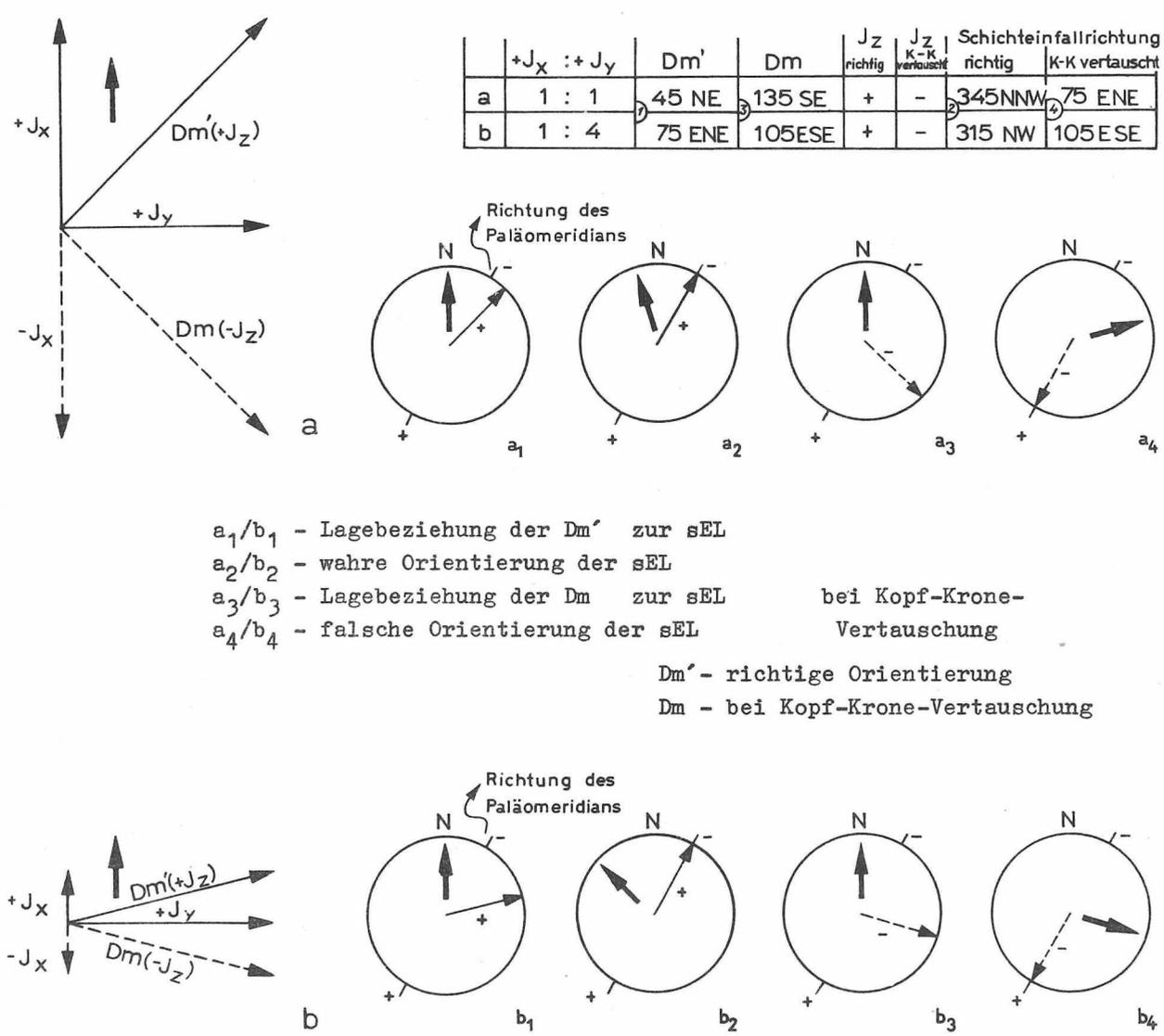


Abb. 13 Nomogramm zur Ermittlung der maximalen Azimutabweichung zwischen wahrer und scheinbarer Schichteinfall-lineare am Kern ($\Delta\lambda$)

Abb. 14 Ermittlung der Einfalllineare im Anstehenden (EL)

2.6.3.2. Kopf-Krone-Vertauschung

Die Kopf-Krone-Beziehung (Liegend-Hangend-Beziehung) der Bohrkerne muß eindeutig festliegen, um die Kerne richtig orientieren zu können. Nichterkannte Kopf-Krone-Vertauschungen führen zu schwerwiegenden Irrtümern bei der Bestimmung der Raumlage der Schichtung. Eine Vertauschung von Kopf und Krone am Bohrkern ist in den meisten Fällen anhand der Zerstörung der uncharakteristischen Remanenz zu erkennen (s. 2.6.4.1.). Wurde die schichtflächenparallele Remanenzrichtung bei Kopf-Krone-vertauschter Lage bestimmt, so kann man die wahre Remanenzrichtung (in Beziehung zur Schichteinfall-lineare) ohne Neubeprobung ermitteln.



a_1/b_1 - Lagebeziehung der Dm' zur sEL
 a_2/b_2 - wahre Orientierung der sEL
 a_3/b_3 - Lagebeziehung der Dm zur sEL
 a_4/b_4 - falsche Orientierung der sEL

bei Kopf-Krone-
 Vertauschung

Dm' - richtige Orientierung
 Dm - bei Kopf-Krone-Vertauschung

Abb. 15 Beispiele für die Auswirkung einer Kopf-Krone-Vertauschung auf die Lagebeziehung zwischen mittlerer Deklination und Schichteinfalllineare und auf die Orientierung letzterer

Die Richtung der J_y -Komponente in den Probenwürfeln entspricht der Streichrichtung im Bohrkern (s. Abb. 3). Die J_y -Komponente behält bei einer Kopf-Krone-Vertauschung ihre Größe und Richtung bei; dagegen ändern sich die Richtungen der J_x - und der J_z -Komponente um 180° und damit ihre Vorzeichen. Ist bei falscher Kopf-Krone-Orientierung bereits die mittlere schichtflächenparallele Remanenzrichtung (D_m) einer Probe berechnet, so wird diese an der J_y -Achse des Bohrkerns gespiegelt, und man erhält die wahre mittlere Deklination D_m' (s. Abb. 15). Gleichzeitig ändert sich das Vorzeichen der Inklination (J_z). Bei einer nichterkannten Kopf-Krone-Vertauschung wird deshalb infolge des falschen Vorzeichens der Inklination neben der bereits verkehrt bestimmten Richtung der schichtflächenparallelen Remanenz (D_m) diese auch noch zusätzlich um 180° verdreht ausgerichtet (Abb. 15a₄, b₄). Es ist darum besonders wichtig, Kopf-Krone-Vertauschungen zu vermeiden bzw. sie zu erkennen und rückgängig zu machen, da sie sowohl die Streich- als auch die Einfallrichtung verfälschen. Der größte Streichrichtungsfehler infolge einer Kopf-Krone-Vertauschung (max. 90°) entsteht, wenn $J_x = J_y$ ist (Abb. 15a). Der maximale Fehler in der Schichteinfallrichtung (180°) wird durch $J_x = 0$ (angenähert in Abb. 15b dargestellt) verursacht. Bei $J_y = 0$ hingegen erhält man trotz der Kopf-Krone-Vertauschung sowohl die Streich- als auch die Einfallrichtung entsprechend den wahren Verhältnissen.

2.6.4. Betrachtung zu Randproblemen

2.6.4.1. Zur Möglichkeit der Kopf-Krone-Orientierung mit Hilfe der natürlichen remanenten Magnetisierung

Während der Entmagnetisierung zeigen die Proben eine typische Veränderung der Inklination: Die positiven Inklinationen werden systematisch kleiner bzw. negativ, während in negativen Proben die Inklination größer wird (Abb. 7c-f). Daraus folgt, daß während der Entmagnetisierung eine nach unten gerichtete VRM zerstört wird.

Dieses Verhalten der Inklination ist folgendermaßen zu erklären: Das Gebiet der Norddeutsch-Polnischen Senke lag nach paläomagnetischen Angaben im Paläozoikum äquatornäher als rezent (s. 2.3.2.); die Inklination der sy sedimentären NRM der paläozoischen Gesteine ist infolgedessen kleiner als die heutige Inklination in diesem Gebiet. Die im Gestein enthaltene VRM, die aus mehreren Komponenten bestehen kann, ist relativ jung und hauptsächlich bei der jetzigen Erdfeldkonfiguration entstanden. Sie hat deshalb eine Inklination, die der rezenten von ca. 70° nahekommt. Da sich die paläozoisch entstandene CARM in den bearbeiteten Proben (niedrige Inklination) und die VRM (hohe, nach unten gerichtete Inklination) vektoriell addieren, verändert sich bei der Entmagnetisierung die resultierende Inklination infolge der Zerstörung der VRM systematisch in der beobachteten Weise. Daraus folgt: Wird die Inklination in einer positiv magnetisierten Probe größer bzw. in einer negativen kleiner, so ist der Bohrkern Kopf-Krone-vertauscht (Abb. 7e).

In vielen Fällen weichen die Schichteinfallrichtungen Kopf-Krone-vertauschter Proben von der mittleren Einfallrichtung in der Bohrung bedeutend ab (Bohrungen I, IV, VIII und XI), fallen jedoch nach einer Kopf-Krone-Korrektur (s. 2.6.3.2.) mit ihr zu-

sammen. Eine mittels der Inklinationsänderung nachgewiesene Kopf-Krone-Vertauschung eines Bohrkerns wird so durch die abweichende Einfallrichtung des Kerns von der mittleren Schichteinfallrichtung noch untermauert. In Proben mit einer CRM ist die Inklinationsänderung kleiner als in solchen mit einer DRM, jedoch stets deutlich nachweisbar.

Das Verhalten der Inklination bei der Entmagnetisierung ist nicht immer eindeutig. In stark einfallenden Schichten ist entsprechend dem Beprobungsprinzip nicht die gesamte VRM, die sehr steil bzw. bohrlochachsenparallel orientiert ist, in der J_z -Komponente des Probenwürfels enthalten, sondern z.T. in den Komponenten J_x und J_y . Infolgedessen kann die Inklination bei der Entmagnetisierung konstant bleiben oder z.B. in positiven Proben größer werden und damit eine falsche Kopf-Krone-Orientierung vortäuschen. In solchen Proben muß die NRM mit Hilfe der Neigungskorrektur (s. 2.5.3.) aus dem schichtflächenbezogenen in ein bohrlochachsenbezogenes Koordinatensystem transformiert werden. Nach dieser Transformation zeigt die Inklination bei der Entmagnetisierung meistens einen eindeutigen Trend, und die Frage "vertauscht oder nicht vertauscht" ist sicher zu beantworten. In Zweifelsfällen sollte deshalb stets versucht werden, mittels der Neigungskorrektur Klarheit über die Kopf-Krone-Orientierung zu gewinnen.

Die 85 untersuchten Proben ergaben folgendes Bild:

| | |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| I richtig orientiert: | 59 Proben |
| II Kopf-Krone-vertauscht: | 9 Proben |
| III NRM wegen geringer Intensität nicht vermessen oder inhomogen: | 10 Proben |
| IV Kopf-Krone-Orientierung nicht eindeutig: | 7 Proben |

Aus dieser Aufstellung ist ersichtlich, daß bei 68 Proben, das sind 80 % der Gesamtzahl, die Kopf-Krone-Orientierung mit Hilfe der NRM eindeutig festzulegen war. Mehrere Proben mit einer geringen Intensität (Gruppe III) wurden nur bei 0 Oe vermessen. Mittels einer Entmagnetisierung in kleinen Schritten (50 Oe) ist zu erwarten, daß man die Kopf-Krone-Orientierung einiger Kerne noch zusätzlich festlegen kann. Insgesamt sind demnach mehr als 80 % der hier untersuchten Proben anhand ihrer NRM sicher Kopf-Krone-orientierbar.

2.6.4.2. Zur Möglichkeit einer paläomagnetischen Stratigraphie in Bohrungen

Die Gesteine der Erdkruste sind sowohl normal als auch invers magnetisiert. "Eine Magnetisierung wird als invers bezeichnet, wenn sie genau oder auch nur in etwa antiparallel zum heutigen Magnetfeld der Erde am Fundort des Gesteins gerichtet ist" (ANGENHEISTER & SOFFEL 1972, S. 71). Diese auch anderweitig gebrauchte Definition befriedigt nicht, denn die Remanenz paläozoischer Gesteine ist oft weder parallel noch antiparallel zum heutigen Magnetfeld gerichtet, und doch besitzen die Gesteine eine eindeutige Polarität.

Eine Remanenz wird in dieser Arbeit als normal bezeichnet, wenn sie in Richtung des Paläonordpols zeigt, und als invers, wenn sie in Richtung des Paläosüdpols weist. Da man die Wanderungskurve der Paläopole für Europa bis ins Ordovizium zurück relativ sicher kennt (s. CREER 1970b), ist mit dieser Definition die Polarität ordovizischer und jüngerer Gesteine zweifelsfrei festzulegen.

Eine inverse Remanenzrichtung im Gestein entsteht durch Selbstumkehr (einer normalen Remanenz) oder bei invers polarisiertem Magnetfeld. Für die Selbstumkehr schuf NEEL (1951) [in ANGENHEISTER (1964)] mehrere Modelle. Es gilt jedoch als sicher, daß die Ursache für die weltweite Wechselfolge von normal und invers magnetisierten Gesteinen Feldinversionen sind, ohne daß man bis heute eine anerkannte Theorie des Inversionsvorganges bzw. seiner Ursachen besitzt.

Im Känozoikum wird die Wechselfolge von normal und invers magnetisierten Gesteinen bereits in großem Umfang für die stratigraphische Korrelation fossiliferer oder fossilarmer Schichten sowohl auf dem Festland (POSPELOVA [in BRODSKAJA 1960]; CHRAMOV 1958; SCHENK 1970) als auch in Ozeanen (u.a. COX 1969) genutzt. Am bekanntesten ist die Korrelation normal und invers magnetisierter Basalte des Ozeanbodens, die die Basis der Spreading-Hypothese bildet. Für Teile des Paläozoikums wurde vor allem von sowjetischen Autoren eine paläomagnetische Skala geschaffen. Obwohl sie noch nicht so detailliert erarbeitet ist wie jene für das Känozoikum (COX 1969) und Mesozoikum (PECHERSKI 1970 [in CREER 1971]), läßt sich erkennen, daß die Polaritätsintervalle (Definition nach IRVING 1971) im Paläozoikum länger waren als im Känozoikum. So konnte LIN'KOVA (1963) nachweisen, daß im Oberdevon des Nordwestteils der Russischen Plattform lediglich zwei inverse und ein normales Polaritätsintervall vorkommen. Mit Hilfe der biostratigraphisch geeichten Abfolge normal und invers polarisierter Schichten ist eine weltweite Stratigraphie möglich. Die paläomagnetische stratigraphische Korrelation hat den wesentlichen Vorteil, daß sie faziesunabhängig ist, sofern die Gesteine magnetisch wirksame Minerale enthalten. In gut aufgeschlossenen Gebieten konnte mit ihrer Hilfe bereits eine Parastratigraphie aufgestellt werden (CHRAMOV 1958; CHRAMOV, RODIONOV & KOMISSAROVA 1965; Basalte des Ozeanbodens).

Unter zwei Voraussetzungen kann man auch in Bohrungen eine paläomagnetische Stratigraphie treiben:

1. Normal und invers magnetisierte Schichten müssen eindeutig bestimmbar sein;
2. die Bohrungen müssen durchgängig gekernt werden.

In den untersuchten Bohrungen ist die zweite Voraussetzung nicht und die erste nur zum Teil erfüllt, so daß eine zweifelsfreie paläomagnetische Stratigraphie z.Z. nicht möglich ist. Trotzdem können anhand der bekannten Polarität von unorientiert gezogenen Bohrkernen stratigraphische Aussagen getroffen werden.

Dafür zwei Beispiele: In den Bohrkernen des Visé der Bohrung III wurde mit Hilfe der Neigungskorrektur eine posttektonische Remagnetisierung nachgewiesen. Diese Remagnetisierung war nur vor der Überdeckung mit mächtigen Rotliegendevulkaniten möglich. Da während des Perms das Magnetfeld der Erde vorwiegend invers polarisiert war (IRVING 1971; ROTHER 1971), können die normal polarisierten Kerne der Bohrung III nur oberkarbonisch remagnetisiert worden sein. - Zeigen die als gleichaltrig einge-

stufen Schichtenfolgen zweier Bohrungen unterschiedliche Polarität, so sind sie nicht altersgleich. Da die Polaritätsintervalle im Paläozoikum im Durchschnitt einige Millionen Jahre dauern, kann solch eine Aussage wesentlich sein.

Schwer gliederbare Ablagerungen, deren Hangendes und Liegendes biostratigraphisch oder lithostratigraphisch einzustufen ist, können bei Anwesenheit von Inversionen im Kernmaterial eindeutig korreliert werden. Möglich wäre dies z.B. in Rotliegendesedimenten oder -vulkaniten, die in mehreren Bohrungen durchgängig gekernt wurden.

2.6.4.3. Zur Isolierung der Ablagerungsmagnetisierung in roten Sedimenten

Rotfarbene Sedimente enthalten in der Regel eine DRM und eine CRM (COLLINSON 1969; BUREK 1969; ROY & PARK 1972). Die DRM wird durch die um ein vielfaches stärkere CRM völlig maskiert. BUREK (1969) und ROY & PARK (1972) beschreiben eine Säurebehandlung roter Sedimente, bei der die viskosen NRM-Komponenten und die CRM zerstört werden, während die DRM im Gestein zurückbleibt. Die Isolierung der DRM in remagnetisierten Gesteinen ist wertvoll, weil das Alter der Remagnetisierung in vielen Fällen nicht bekannt ist und demzufolge der Wert paläomagnetischer Untersuchungen durch die Remagnetisierung oft erheblich eingeschränkt wird.

In 41 Würfeln von 17 rotfarbenen Proben (Bohrungen III, IV, VI, VIII, XI) wurde versucht, die CRM mit Hilfe einer Aussäuerung zu entfernen. Die Würfel wurden zunächst in mehreren Soxleth-Apparaturen 110 Stunden lang mit Tetrachlorkohlenstoff behandelt, um eventuell beim Sägen in die Poren eingedrungenes Bohröl (Kühlmittel) zu extrahieren. Danach wurden die Proben in einen Glasbehälter gelegt und 3-normale Salzsäure (BUREK 1969) in kleinen Mengen über mehrere Tage verteilt zugegeben, damit die Luft vollständig aus den Proben entweichen konnte. Die Proben blieben 9 Tage unter HCl-Bedeckung. Die Azimutdifferenz der Proben vor und nach der Säurebehandlung betrug maximal 10° , im allgemeinen $0 - 5^{\circ}$, während sich die Intensität der Remanenz nur minimal veränderte. Die Rotfärbung blieb erhalten; sie hellte lediglich etwas auf.

Diese Beobachtungen deuten darauf hin, daß mit der beschriebenen Versuchsanordnung die CRM nicht angegriffen wird. Die Ursachen hierfür sind die geringe Porosität, die meistens kleiner als 1 % ist, und die minimale Permeabilität der Gesteine. Unter diesen Bedingungen ist es wahrscheinlich, daß selbst mittels eines Hindurchpressens der Salzsäure durch die Proben (BUREK 1969), sofern das überhaupt möglich ist, die CRM nicht zerstört und damit die DRM nicht isoliert werden kann.

Zu Vergleichszwecken wurden zwei Würfel der Probe 72 (grauer Tonstein) in gleicher Weise behandelt wie die roten Proben. Die Remanenz dieser Würfel war nach der Säurebehandlung bis auf einen kleinen Rest zerstört, so daß die Remanenzrichtung nicht mehr sicher zu bestimmen war. Hieraus folgt, daß die Salzsäure die DRM fast völlig zerstört hat. Es ist deshalb anzunehmen, daß die von BUREK (1969) sowie ROY & PARK (1972) beschriebene Säurebehandlung zur Isolierung der DRM in remagnetisierten Gesteinen nur in Einzelfällen zum Erfolg führt. - In den hier untersuchten Proben ist der Zeitraum, in dem die CRM entstand, auf ein System zu begrenzen. Deshalb sind die Proben mit einer CRM ausgezeichnet zur Bohrkernorientierung geeignet.

2.6.4.4. Auswertung der Paläopolpositionen hinsichtlich ihrer regionaltektonischen Aussage

Die publizierten Paläopolpositionen haben sehr unterschiedliche Aussagekraft, weil u.a.

- die stratigraphische Einstufung des untersuchten Gesteins oft nur in weiten Grenzen bekannt ist,
- Teilproben-, Proben- und Aufschlußzahl nicht angegeben sind,
- Beprobungsfehler nicht erkannt wurden (z.B. die Schieferung mit der Schichtung verwechselt wurde),
- keine Angaben zur Genauigkeit der Messungen vorliegen,
- die Proben nicht ausreichend magnetisch gesäubert wurden,
- Säkularvariationen bei kleinen Probenkollektionen verfälschend wirken,
- Faltungs- und Konglomeratteste nicht durchgeführt wurden.

Die Auswahl "sicherer" Polpositionen ist problematisch, da in zahlreichen Arbeiten die Angaben nicht ausreichen, um die Vertrauenswürdigkeit der Ergebnisse einzuschätzen. Bei einer strengen Auswahl "sicherer" Polpositionen wären so wenig Daten zur Interpretation zurückgeblieben, daß sie für eine statistische Auswertung kaum ausgereicht hätten. Aus diesem Grunde sind alle erreichbaren publizierten Polpositionen für Eurasien vom Ordovizium bis zum Perm (325) ohne Unterschied hinsichtlich ihrer regionaltektonischen Aussage ausgewertet und in Anlage 2 tabelliert worden. Da keine Auswahl sicherer Polpositionen erfolgte, wurden die nachstehenden Schlußfolgerungen sehr vorsichtig gezogen, so daß die getroffenen Aussagen trotz des inhomogenen Ausgangsmaterials relativ sicher sind.

Die Variation der permischen Paläopole (VGP - virtual geomagnetic pole) ist im Vergleich zu der anderer Systeme gering. Alle VGP von der Apenninen- und Pyrenäenhalbinsel, von Sardinien, Korsika und der Provence sowie einige vom asiatischen Teil der Sowjetunion außerhalb der Sibirischen Tafel weichen deutlich von der mittleren permischen Pollage Eurasiens ab. Die VGP der Sibirischen Tafel und des Urals stimmen jedoch mit den europäischen überein. Die silesischen VGP der Osteuropäischen Tafel, von Mesoeuropa und unter Vorbehalt der Britischen Inseln und des Urals (Sibirische Tafel ohne Werte) differieren nur wenig. Daraus ergibt sich:

1. Zumindest seit dem Perm, aber wahrscheinlich seit dem Siles, bildet Mesoeuropa zusammen mit Paleuropa, der Osteuropäischen Tafel, dem Ural und der Sibirischen Tafel eine Einheit, deren Teile sich seitdem untereinander nicht mehr wesentlich, wahrscheinlich gar nicht, verschoben haben.
2. Südlich des alpidischen europäischen Faltengürtels liegende, variszisch konsolidierte Gebiete haben postpermisch ihre Lage zum stabilen Teil Europas erheblich geändert.

Im Dinant variiert die Lage der VGP in eng begrenzten Gebieten wie Großbritannien, der Osteuropäischen Tafel und der Sibirischen Tafel stärker als im Perm und Siles. Ein wesentlicher Grund hierfür liegt in der lithologischen Ausbildung der Gesteine und ihren daraus resultierenden magnetischen Eigenschaften. Eine sichere tektonische Aussage kann deshalb nicht getroffen werden. Die devonischen VGP von Großbritannien, Norwegen, der Osteuropäischen und der Sibirischen Tafel sind in sich jeweils relativ

gut konzentriert. Die mittleren VGP der Osteuropäischen und der Sibirischen Tafel sowie von Norwegen zeigen nur geringe Differenzen, während der mittlere VGP von Großbritannien signifikant von ersteren abweicht (siehe auch 2.6.8.). Anzahl und Homogenität der silurischen Paläopole reichen für tektonische Aussagen nicht aus. Die ordovizischen VGP von Großbritannien und der Sibirischen Tafel liegen jeweils in einem relativ eng begrenzten Gebiet. Die Lage der VGP der Osteuropäischen Tafel und die bisher veröffentlichten ordovizischen VGP der ČSSR variieren dagegen relativ stark. Die mittleren VGP aus den genannten vier Gebieten differieren alle signifikant.

Eine Kontinentaldrift ist nach BUCHA (1964) nur dann wahrscheinlich, wenn die Polwanderungskurven von verschiedenen Kontinenten systematisch differieren. Aus kleinen Differenzen zwischen mittleren VGP, die eventuell sogar nur für ein System bestehen, dürfen keine geotektonischen Schlußfolgerungen gezogen werden. Unter diesem Gesichtspunkt ergeben sich aus den silesischen, devonischen, silurischen und ordovizischen VGP folgende Aussagen:

3. Die geringe Zahl und z.T. beträchtliche Inhomogenität der bisher publizierten Daten, auch auf engem Raum, lassen nur bedingt tektonische Aussagen zu, da vor allem im Devon und Ordovizium nicht sicher geklärt ist, ob die signifikanten Abweichungen der mittleren VGP einiger tektonischer Einheiten durch Remagnetisierung in einzelnen Gebieten während jüngerer Systeme oder durch Scholldrehungen bedingt sind.
4. Wird eine Remagnetisierung ausgeschlossen, wie das beim überwiegenden Teil der Autoren geschieht, so hat postdevonisch eine Relativbewegung zwischen den Britischen Inseln und der Osteuropäischen Tafel und postordovizisch eine solche zwischen der Sibirischen und der Osteuropäischen Tafel einschließlich des Böhmisches Massivs stattgefunden. Dementsprechend wären die Relativbewegungen zwischen einzelnen Krustenteilen sowie zwischen diesen und den Paläopolen vorzugsweise an die Zeiten der weltweiten geotektonischen Zyklen gebunden, wie das auch von STORETVEDT (1970) angedeutet wird und nach CREER (1964) und IRVING (1966) [beide in STORETVEDT (1970)] für die südlichen Kontinente zutrifft.

2.7. Optimierung des Verfahrens

Die Beprobung des Kernmaterials der Bohrungen wurde entsprechend den in der Literatur gegebenen Hinweisen und Richtlinien für die Beprobung von Übertageaufschlüssen vorgenommen (s. 2.4.1.). IRVING (1964), S. 102, gibt 6 Kriterien für die Zuverlässigkeit paläomagnetischer Ergebnisse an. Für die paläomagnetische Bohrkernorientierung sind davon 3 wesentlich, da sie u.a. die Zahl der zu untersuchenden Proben und Würfel bestimmen.

1. Es müssen mindestens 5 einzeln orientierte Proben mit übereinstimmenden Beobachtungen vorhanden sein (nach ANGENHEISTER & SOFFEL (1972) mindestens 4 Proben).

In den 11 bearbeiteten Bohrungen ist die Variation zwischen den Remanenzrichtungen der Würfel einer Probe relativ gering gegenüber der Variation zwischen den mittleren Remanenzrichtungen der Proben. Deshalb gilt prinzipiell, daß die Zahl der untersuchten Würfel je Probe (6) zugunsten der bearbeiteten Probenzahl je Bohrung (6) reduziert

werden kann. Die Probenzahl, die zur Raumlagebestimmung der Schichtung in Bohrungen notwendig ist, hängt von geologischen Faktoren und den Eigenschaften der NRM ab. Je weniger das Profil gestört, je größer das Schichteinfallen, je kleiner das Verhältnis Bohrlochneigung zu Schichteinfallen am Kern, je homogener die NRM und je kleiner der Anteil der uncharakteristischen Remanenz an der Gesamtremanenz ist, desto weniger Proben müssen untersucht werden. Die Zahl von 5 Proben sollte jedoch für eine in sich ungestörte Einheit nie unterschritten werden.

2. Der Vertrauenskreis α_{95} muß kleiner als 25° sein.

Der Vertrauenskreis α_{95} ist ein Maß für die Homogenität der NRM in einem bestimmten Gesteinsvolumen. In dieser Arbeit wurde α_{95} für jede Probe ermittelt, wobei seine Größe auch durch die Präzision bestimmt wird, mit der die Würfel aus einer Probe herausgesägt wurden (s. 2.6.2.5.). Proben mit α_{95} bis 10° haben in dieser Arbeit eine homogene, mit α_{95} zwischen 10 und 15° eine nahezu homogene und mit $\alpha_{95} > 15^\circ$ eine inhomogene Remanenz. Letztgenannte Proben sind zur Kernorientierung ungeeignet. Wenn die NRM homogen ist (α_{95} bis 10°), so kann die Anzahl der Würfel je Probe auf drei, mindestens zwei beschränkt werden, da durch die Untersuchung weiterer Würfel kein wesentlicher Erkenntniszuwachs mehr zu erreichen ist.

3. Das Alter der Gesteine bzw. ihrer charakteristischen Remanenz muß mindestens in den Grenzen Altpaläozoikum, Jungpaläozoikum, Mesozoikum bekannt sein.

Das Alter der Bohrkerne bzw. der CARM ist in den 11 untersuchten Bohrungen zumindest auf ein System eingegrenzt und damit für paläomagnetische Fragestellungen genau genug bekannt.

Auch die stufenweise Entmagnetisierung der Proben kann optimiert werden. Zunächst muß in einer Probe je Gesteinsart (Ton-, Silt-, Sand-, Kalk- und Mergelstein) und Bohrung mit Hilfe einer Entmagnetisierung in den Stufen 50, 100, 200, 400 und 800 Oe getestet werden, welcher Art und wie stark die Remanenz ist und wie sie sich gegenüber Wechselfeldern verhält. Danach wird entschieden, welche Entmagnetisierungsstufen bei der Bearbeitung weiterer Proben übersprungen werden können. Die Entmagnetisierung bei 50 Oe kann in der übergroßen Zahl der Proben wegfallen. In Gesteinen mit einer DRM reicht es in der Regel aus, bei 100, 200 und 400 Oe zu entmagnetisieren. Gesteine mit einer paläomagnetisch stabilen CRM brauchen bei einer routinemäßigen Bearbeitung nur bei 400 und 800 Oe entmagnetisiert zu werden, ohne daß wesentliche Informationsverluste entstehen.

Mit Hilfe der Untersuchung von Pilotproben kann und muß man eine optimale Untersuchungsvariante (Proben- und Würfelzahl, Entmagnetisierungsstufen) erarbeiten. Sie hängt von den geologischen Gegebenheiten und den magnetischen Eigenschaften der Gesteine ab. Wegen der von Bohrung zu Bohrung wechselnden geologischen Bedingungen ist es nicht möglich, einen perfektionierten Beprobungs- und Bearbeitungsstandard anzugeben. Zusammenfassend kann gesagt werden, daß für einen in sich tektonisch weitgehend ungestörten Bereich mit deutlichem Schichteinfallen ($\geq 10^\circ$) und paläomagnetisch stabilen Gesteinen 10 Proben (à 3 Würfel) je System bzw. 1000 m Teufe ausreichen, um die Schichteinfallrichtung je nach dem Alter der CARM der Proben mit einer Genauigkeit von $10 - 20^\circ$ festzulegen (siehe Abschnitt 2.8.). Für einen in sich homogen strukturierten Bereich sollten mindestens 5 Proben genommen werden.

2.8. Eignung und Genauigkeit des Verfahrens

Das Verfahren zur paläomagnetischen Bohrkernorientierung führt zum Erfolg, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

1. Die Gesteine müssen die zum Schneiden der Würfel notwendige mechanische Festigkeit aufweisen.
2. Man muß ein geeignetes Bezugssystem für die Messung der Remanenz wählen. Bei deutlichem Schichteinfallen am Bohrkern kann diese Aufgabe die Schichteinfalllineare übernehmen. Andernfalls müssen die anhand ihrer Bruchflächen zusammengepaßten Kerne mit einer geraden Linie versehen werden, die dann paläomagnetisch orientiert wird.
3. Die Geometrie der Bohrung (Bohrlochabweichung) muß genau bekannt sein.

Die Orientierbarkeit der Bohrkernkerne hängt von ihrer Lithologie und ihrer Remanenz ab.

4. Bei Gesteinen mit einer DRM (in der Regel graue feinklastische Sedimentite) eignen sich Ton- und Siltsteine mit unterschiedlichem karbonatischem Anteil gut zur Orientierung, während man Sandsteine nicht orientieren kann.
5. Sedimentite mit einer CRM (im Untersuchungsmaterial rotfarben) sind unabhängig von der Korngröße besonders gut orientierbar, sofern das Alter ihrer charakteristischen Remanenz zu bestimmen ist.
6. Für die paläomagnetische Bohrkernorientierung eignen sich die Gesteine jener Systeme, für die das Paläokoordinatensystem, speziell die Richtung des Paläomeridians, mit hinreichender Genauigkeit berechnet werden kann. Für die Norddeutsch-Polnische Senke sind das Trias, Perm, Karbon und Devon.

Die erwähnten Gesteine dieser Systeme sind gut zu orientieren, weil

7. die schichtflächenparallele bzw. horizontale Komponente der charakteristischen Remanenz, die man für die paläomagnetische Kernorientierung verwendet, stärker und damit richtungskonstanter ist als die dazu senkrecht orientierte Komponente der Remanenz (Inklination),
8. eine deutliche Differenz zwischen den Richtungen sowie zwischen der Stabilität der charakteristischen und der uncharakteristischen Remanenz vorhanden ist und infolgedessen beide gut voneinander getrennt werden können.

Das Verfahren zur paläomagnetischen Bohrkernorientierung wurde in dieser Arbeit so weit entwickelt, weil

- kein kontinuierlich messendes Stratalog zur Verfügung steht,
- die Lagerungsverhältnisse des Präzechsteins mit Hilfe der Reflexionsseismik, Gravimetrie, Magnetik und der anderen Verfahren zur Raumlagebestimmung der Schichten nicht mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden können,
- für die Anwendung des paläomagnetischen Verfahrens ausgezeichnete Voraussetzungen vorliegen (umfangreiches und paläomagnetisch geeignetes Kernmaterial günstiger Systeme, Hochleistungs-Rockgenerator, in vielen Fällen relativ sicher bekanntes Paläogradnetz für das Untersuchungsgebiet, genaue Bohrlochabweichungsmessungen),

- ein großer Bedarf an relevanten Daten über Streichen und Fallen im Präzechstein der Norddeutsch-Polnischen Senke vorliegt, der besonders gut mit Hilfe des paläomagnetischen Verfahrens zu befriedigen ist,
- bereits in großem Umfang vorliegendes Kernmaterial zur Untersuchung genutzt werden kann.

Die Genauigkeit des Verfahrens hängt ab

1. von der Homogenität der Remanenz in den Proben; sie liegt in den untersuchten Ton- und Siltsteinen sowie den rotfarbenen Proben in einem Bereich zwischen $\alpha_{95} = 1^\circ$ und 19° , im Durchschnitt bei $\alpha_{95} = 6,5^\circ$;
2. von der Richtungskonstanz der Remanenz zwischen den Proben; die mittlere Streuung der Remanenz zwischen den Proben einer Bohrung ist $\sigma = 10,2^\circ$ (Bohrungen I, III, IV, VII, VIII, XI); sie ist abhängig vom Probenabstand und muß z.T. auf die nicht konstante Einfallrichtung in einer Bohrung, die als Bezugssystem der Messung diente, zurückgeführt werden;
3. von der Richtungsgenauigkeit des berechneten mittleren Paläomeridians; sie schwankt in den Grenzen $4,8^\circ$ (Siles) und $11,2^\circ$ (Devon), Tab. 3. Dies sind die maximalen Fehlergrenzen, die unter Berücksichtigung aller publizierten Paläopolpositionen berechnet wurden. Die wahre Toleranz ist sicher geringer.

Nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz für die Addition von skalaren Größen (19)

$$(19) \quad m_F = \sqrt{m_\alpha^2 + m_\beta^2 + m_\gamma^2}$$

(m_F = mittlerer Fehler) ergibt sich aus den drei obengenannten Fehlerquellen und den verwendeten Ausgangsgrößen ein mittlerer Orientierungsfehler für Proben aus dem Siles von $13,0^\circ$ und für Proben aus dem Devon von $16,5^\circ$.

3. Weitere Verfahren zur nachträglichen Orientierung von Bohrkernen

3.1. Orientierung nach der Schichtneigungsmessung

3.1.1. Orientierungsprinzip

Das Prinzip der Schichtneigungsmessung (Stratalog) ist in Abb. 16 dargestellt. Beim Aufwärtsbewegen der Schichtneigungssonde werden drei Kurven gleichzeitig aufgezeichnet. Wenn das Elektrodensystem der Sonde die Grenze zwischen zwei Gesteinsformationen mit unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften passiert, kommt es zu übereinstimmenden Veränderungen im Verlauf der Kurven, die bei Schichtneigung in etwas verschiedener Tiefe auftreten. Aus den vertikalen Abweichungen der homogenen Punkte der drei Kurven wird unter Berücksichtigung des Bohrlochkalibers, der Bohrlochabweichung und der Orientierung des Elektrodensystems Streichen und Fallen ermittelt. Die Auswertung der Messungen erfolgt mit Nomogrammen nach SWIFT (1959) oder auf rechnerischem Wege (KOMAROV 1957). Nach beiden Verfahren erhält man mit Hilfe der Korrelation gleicher Punkte, die auf den drei aufgezeichneten Kurven liegen, eine Einfalllineare (EL). Aus den EL einer Meßstrecke (5 bis 10 m lang) wird die mittlere Einfalllineare (\overline{EL}) durch arithmetische Mittelwertbildung errechnet. In verrohrten Bohrungen können Schichtneigungsmessungen nicht mehr vorgenommen werden, weil das Elektrodensystem Kontakt zum Anstehenden haben muß.

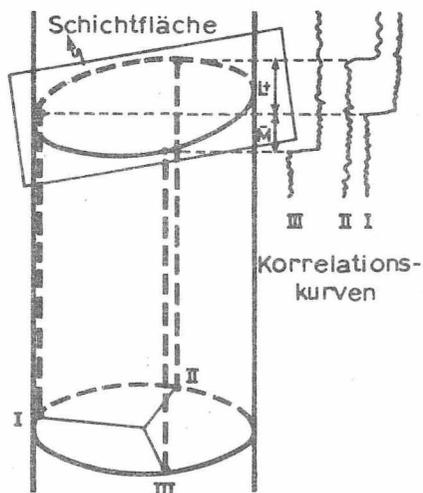


Abb. 16 Prinzip des Stratalogs

3.1.2. Voraussetzungen und Einflüsse

Nach SCHLUMBERGER (1958) werden die besten Stratalogergebnisse von relativ dünnen Schichten im Dezimeterbereich und im Bereich bis zu 3 m Mächtigkeit geliefert, die scharf mit den angrenzenden Gesteinen kontrastieren. Solche Zonen sind dünne Kalksteinschichten oder widerstandsfähige Sandsteine mit eingelagerten Tonsteinen.

Die Untersuchungen in der Bohrung II zeigen, daß man in parallelgeschichteten Sedimenten mit einem Einfallen von 5° und mehr die Schichteinfallrichtung sicher bestimmen kann (MENNING 1971). In Schrägschichtungsbereichen sind dagegen keine bzw.

nur bedingt Richtungsaussagen möglich, da die Einfallrichtung der Schrägschichtungsblätter in situ stark variiert. In den untersuchten Bohrungen überlappen die Meßstrecken des Stratalogs mit den Kernmärschen nur in Ausnahmefällen (Bhg. II und VII), bzw. in einigen Bohrungen liegen nur sehr wenige Stratalogergebnisse vor. Deshalb war ein Vergleich zwischen dem Gefüge des Bohrkerns und den Ergebnissen der Schichtneigungsmessung, der für die Erzielung sicherer Ergebnisse außerordentlich wichtig ist, nicht möglich.

Mit dem im VEB Geophysik verwendeten Stratalog kann nicht kontinuierlich über eine längere Strecke gemessen werden. Die Länge der Teilmessungen beträgt 5 m, selten 10 m, da die Drehung der Sonde über längere Strecken nicht kontrollierbar ist. In der Bohrung II sind 5 und 10 m lange Intervalle mit dem Stratalog vermessen. In den 5 m langen Meßstrecken ist das Verhältnis von sicheren (aussagekräftigen) zu unsicheren mittleren Einfalllinearen 1 : 1, in 10 m langen Meßstrecken aber 1 : 3. Dies zeigt, daß die Genauigkeit der Schichtneigungsmessung mit einer Verlängerung der Meßstrecken abnimmt.

Die Genauigkeit der Azimutbestimmung der BA hängt von der Größe der Bohrlochneigung ab. Bei einer Bohrlochneigung von $0 - 1^\circ$ ermittelte LANGE (1973) eine mittlere Abweichung des Azimuts von 33° zwischen der initialen und einer Wiederholungsmessung (15 Meßwertpaare). Bei einer Bohrlochneigung $< 1^\circ$ fehlt somit ein relevanter Bezugspunkt für die Orientierung des Elektrodensystems des Stratalogs; folglich sind die Richtungen der nach dem Stratalog ermittelten EL unzuverlässig. Deshalb ist eine Bohrlochneigung von 1° und mehr für die Erzielung sicherer Streichrichtungsangaben unerlässlich.

Die Genauigkeit der Meßwerte wird ebenfalls durch das Bohrlochkaliber und den Aufzeichnungsmaßstab der Kurven beeinflusst. Je größer das Kaliber und der Aufzeichnungsmaßstab, desto größer sind die Differenzen entsprechender Punkte auf den drei Kurven und desto genauer kann die Schichteinfallrichtung bestimmt werden.

Subjektive Fehler entstehen, wenn man die Raumlage der EL aus Indikationen berechnet, die nicht zu einer Schicht gehören. Deshalb kommt der Korrelation der drei Meßkurven besondere Bedeutung zu.

Künftige Schichtneigungsmessungen sollten unter folgenden Gesichtspunkten vorgenommen werden:

1. In den zu messenden Bereichen muß die Bohrlochneigung gleich oder größer als 1° sein.
2. Die Meßstrecken sind anhand des erbohrten Kernmaterials auszuwählen. Schichtkomplexe mit einem scharfen Wechsel von hoch- und niederohmigen Gesteinen im Dezimeter- und Meterbereich und einem Fallen von mehr als 5° sind bevorzugt zu vermessen.
3. Die Länge der Meßstrecken soll 5 m möglichst nicht überschreiten.
4. Es sind mehrere aufeinanderfolgende Bereiche lückenlos zu vermessen.
5. Wiederholungsmessungen beugen Irrtümern und unsystematischen Fehlern vor.

6. Meß- und Kernstrecken sollen überlappen, damit ein direkter Vergleich zwischen Lithologie und Gefüge des Kerns und der Güte der Indikationen sowie zwischen dem Fallen nach der Schichtneigungsmessung und dem Fallen am Kern vorgenommen werden kann.

Abgesehen von Wiederholungsmessungen sind diese Forderungen ohne großen Aufwand zu erfüllen, wobei eine wesentliche Qualitätssteigerung gegenüber älteren Messungen zu erwarten ist.

3.1.3. Einschätzung der Aussagekraft

Alle Schichtneigungsmessungen im Präzechstein der Nordostdeutschen Senke, die der VEB Geophysik bis 1974 durchführte und auswertete, wurden bearbeitet. Da sich die folgenden Zahlenangaben nur auf die bisher durchgeführten, wenig umfangreichen Messungen stützen, kann man nur die Genauigkeit dieser Messungen einschätzen, nicht die absolute Aussagegenauigkeit des Verfahrens.

Die Richtungsgenauigkeit der EL einer Meßstrecke ist nach der herkömmlichen Methode (Berechnung der Streuung) nicht einzuschätzen, da alle EL, die um mehr als 45° vom Mittelwert abweichen, in Anlehnung an FRICKE (1970) eliminiert werden. Um trotzdem die Streuung der EL einer Meßstrecke beurteilen zu können, wurde ein Proportionalitätsansatz aufgestellt (MENNING 1974), mit dem der sogenannte Sicherheitsfaktor (SiF) berechnet wird. In ihn gehen die mittlere Abweichung der einzelnen EL von der mittleren Einfallene (EL), die Zahl der eliminierten Linearen (außerhalb des am stärksten besetzten 90° -Bereiches), die Anzahl der gemittelten EL und die Qualität der Korrelation zwischen entsprechenden Punkten der drei Meßkurven des Stratalogs ein. Die EL wurden dann in drei Gruppen eingeteilt. Entsprechend dieser Einteilung sind in den untersuchten Bohrungen knapp 50 % der EL aussagekräftig (sicher) hinsichtlich der Raumlage der Schichtung.

Abb. 17a zeigt die Verteilung der EL eines Bereiches der Bohrung II. In Abb. 17b sind die EL entsprechend ihrer Qualität (SiF) unterschiedlich gekennzeichnet. Deutlich ist zu sehen, daß die sicheren Werte stärker konzentriert sind als die übrigen. Ein ähnliches Bild ergibt sich in allen bearbeiteten Bohrungen und zeigt, daß der SiF als qualitatives Kriterium für die Unterteilung der EL gut geeignet ist.

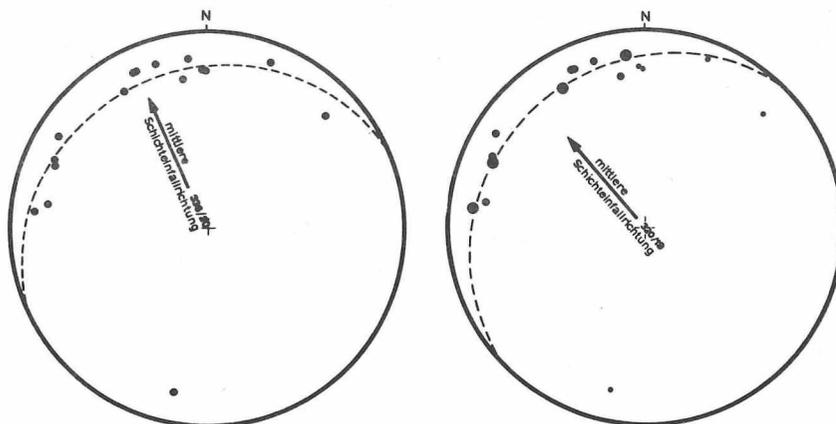


Abb. 17 Mittlere Schicht-einfallene in der Bohrung II (3900 - 4600 m)

- a. ohne Wichtung
 - b. mit Berücksichtigung des Sicherheitsfaktors
- sicher
 - relativ sicher
 - unsicher

In den am stärksten besetzten 90° -Bereichen der Meßstrecken haben die EL eine Streuung zwischen 12° und 40° . Die mittlere Streuung in den als aussagekräftig eingeschätzten Meßstrecken beträgt 28° . Orientiert man dort die einzelnen Bohrkerne anhand ihrer EL, indem man die EL entsprechend der berechneten mittleren Einfallrichtung ausrichtet, so haben die einzelnen Kerne einen mittleren Orientierungsfehler von $\pm 28^\circ$. Diese 28° sind der minimale mittlere Fehler, da die Streuung lediglich für den am stärksten besetzten 90° -Bereich berechnet wurde.

Wie aus Abschnitt 3.1.2. hervorgeht, hängt die Größe des Orientierungsfehlers vor allem von der Schichtneigung und der Neigung des Bohrloches ab. Je größer diese sind, desto genauer kann man die Bohrkerne orientieren bzw. Streichen und Fallen der Schichtung bestimmen. In mehr oder weniger horizontal lagernden Schichten ist die nachträgliche Bohrkernorientierung mit Hilfe des Stratalogs unmöglich.

3.2. Orientierung nach der Bohrlochabweichung

3.2.1. Orientierungsprinzip

Die Bohrlochabweichung (BA) ist die Abweichung der Bohrung von der Vertikalen, die durch den Bohransatzpunkt geht. Sie setzt sich zusammen aus Neigung und Azimut und wird in jeder Bohrung im Abstand von 25 m (im Bedarfsfall auch 5 oder 10 m) mit einem Inklinometer gemessen. Um den Verlauf einer Bohrung zu veranschaulichen, wird die BA im VEB Geophysik graphisch als "Projektion der abgebohrten Strecke auf die Horizontalebene durch den Bohransatzpunkt" in Form eines Polygonzuges dargestellt.

Anzahl und Genauigkeit der Bohrlochabweichungsmessungen sind für eine nachträglich indirekte Orientierung von Bohrkernen gut geeignet, sofern ein direkter Zusammenhang zwischen dem Azimut der BA und der Schichteinfallrichtung besteht. Wie im weiteren gezeigt wird, existiert diese Beziehung unter gewissen Voraussetzungen, da die Bohrkronen infolge der Bohrfähigkeitsanisotropie der Gesteine bestrebt ist, sich senkrecht auf Inhomogenitätsflächen im Gestein, meist auf die Schichtung, zu stellen. Ist diese Voraussetzung erfüllt, so taucht die Bohrung in die entgegengesetzte Richtung ab, in die die Schichten einfallen (Abb. 18).

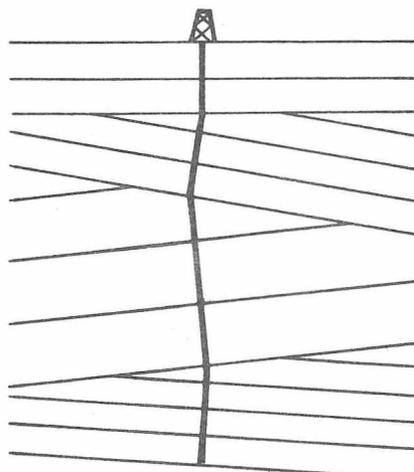


Abb. 18 Beziehung Bohrlochabtauchrichtung - Schichteinfallrichtung

3.2.2. Voraussetzungen und Einflüsse

Die BA hängt von den geologischen Verhältnissen im Bereich der Bohrung und dem Bohrregime ab. WILEY (1965) und LANGE (1973) zeigten, daß beim Bohren in geschichteten bzw. geschieferten Formationen (z.B. Tonstein) eine erheblich größere Bohrlochneigung entsteht als in homogeneren Formationen (z.B. Kalkstein). Deshalb sind in erster Linie die Häufigkeit von sedimentären und tektonischen Gefügeelementen sowie deren Raumlage für die Bohrlochneigung entscheidend. Die Gesteins Härte spielt dagegen eine geringere Rolle (LANGE 1973). Diese allgemeingültige Regel wird durch zwei in ihrer Grundaussage sehr ähnliche Hypothesen gestützt. Nach der Hypothese von MOROSOV & BAJARKO [in PRUSAC & SINDIJA (1967)] ist die Bohrfähigkeit der Gesteine senkrecht zur Schichtfläche am größten, parallel zu ihr am kleinsten (Abb. 19). Folglich geht das Abteufen senkrecht zur Schichtung am schnellsten und stabilsten vor sich. WILEY (1965) nimmt an, daß beim Durchteufen einer Schicht ein Punkt erreicht wird, bei dem die Schicht die angewendete Last nicht mehr abstützen kann und das Gestein bis zur nächsten Schicht hin bricht (Abb. 20). Da viele Gesteine zum Brechen senkrecht zur Schichtfläche neigen, entsteht an jeder Schichtunterkante eine Facette (in Abb. 20 punktiert), die seitliche Kräfte erzeugt und versucht, die Krone in Richtung der Schichtflächennormale abzulenken. Mit stärker werdendem Sohlendruck bricht die Schicht bereits höher ein, und es entstehen größere Facetten. Sie bewirken stärkere Seitenkräfte und diese wiederum eine Vergrößerung der Bohrlochneigung. Da das Bohrgestänge vorzugsweise an Rohrverbindungen und Stabilisatoren an der Bohrlochwand anliegt, verursacht die Schwerkraft in geneigten Bohrungen eine Pendelkraft (PRIKEL 1959). Diese versucht, das Bohrgestänge in die senkrechte Lage zu bringen bzw. es in dieser Lage zu halten. Wenn sich ein Gleichgewicht zwischen den ablenkenden Kräften und der Pendelkraft eingestellt hat, ist der Stabilisationswinkel erreicht, und die BA ändert sich nur unwesentlich bei gleichbleibenden geologischen und bohrtechnischen Bedingungen.

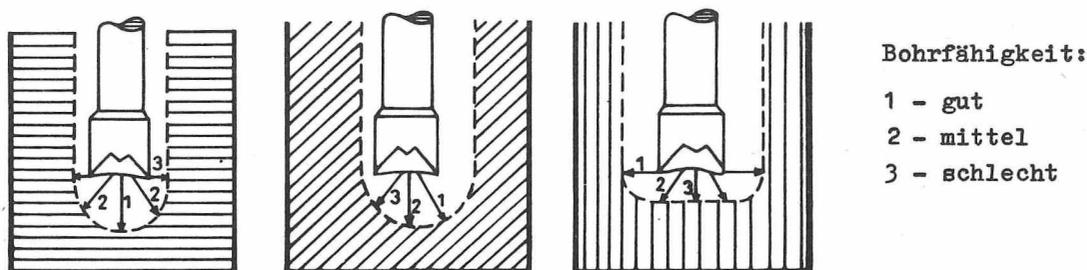
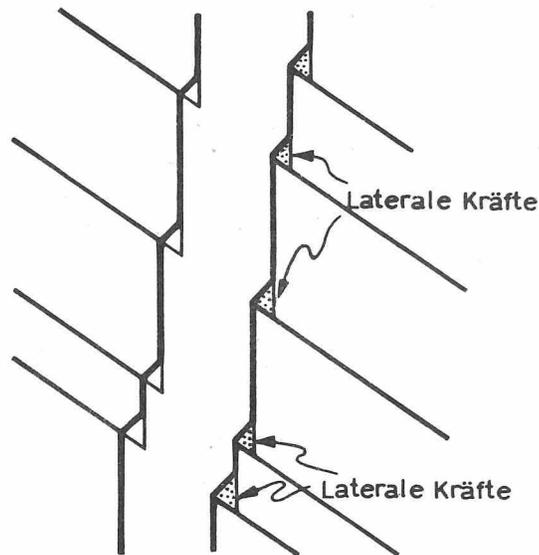


Abb. 19 Bohrfähigkeit der Gesteine nach MOROSOV & BAJARKO
[in PRUSAC & SINDIJA (1967)]

Abb. 20

Ablenkung der Bohrkronen
durch Brechen des Gesteins
senkrecht zur Schichtfläche
(nach WILEY 1965)



Empirische Untersuchungen (LANGE 1973) beweisen, daß auch das Bohrregime einen Einfluß auf die Bohrlochneigung ausübt, wenn dieser auch geringer ist als der Einfluß der geologischen Faktoren. PRUSAC & SINDIJA (1967) zeigen, daß bei einer Vergrößerung des Sohldruckes die Bohrlochneigung aufbaut, während Stabilisatoren ein bewährtes Mittel sind, die Bohrlochneigung klein zu halten (WEIDERMANN 1970). LANGE (1973) kam zu dem Ergebnis, daß die Kronenart einen wesentlichen Einfluß auf die Bohrlochneigung ausübt und daß die Neigung bei langen Bohrgarnituren und dickem Gestänge kleiner bleibt als bei kurzen Garnituren und dünnem Gestänge. Aus den aufgezählten Fakten geht hervor, daß das Bohrregime die Neigung des Bohrloches wesentlich beeinflusst.

Die Neigung des Bohrloches wird außerdem durch geologische Faktoren bestimmt. Bei Schichteinfallen bis 30° steigt in den untersuchten Bohrungen die Bohrlochneigung tendenziell mit einer Erhöhung des Einfallens. Dieser Trend wird jedoch stark durch die bohrtechnischen Bedingungen überprägt, so daß eine parallel verlaufende Erhöhung von Einfallen und Bohrlochneigung in den bearbeiteten Bohrungen nur tendenziell belegt werden kann.

3.2.3. Einschätzung der Aussagekraft

Ein Vergleich der nach den einzelnen Orientierungsverfahren ermittelten Ergebnisse zeigt, daß Bohrlochabtauch- und Schichteinfallrichtung unter bestimmten Bedingungen entgegengesetzt orientiert sind. Solche Bedingungen liegen nach den hier angestellten Untersuchungen vor allem bei einem Schichteinfallen von 10° und mehr und einer Bohrlochneigung von 5° (4°) und mehr vor. Bei einem kleineren Schichteinfallen und/bzw. einer kleineren Bohrlochneigung sind alle Übergänge zwischen gleicher und entgegengesetzter Richtung des Bohrlochabtauchens und des Schichteinfallens zu beobachten. Dieses Verhalten der BA resultiert aus folgenden Ursachen:

- Wechselt bei Schichtmächtigkeiten unter 100 m (u.a. groß- und mitteldimensionale Schrägschichtung) die Schichteinfallrichtung ständig, so ist aus mechanischen Gründen eine sofortige Anpassung der Krone an die Raumlage der Schichtung nicht möglich, da das Bohrgestänge nur relativ geringe Knickbeträge zulässt.
- In nahezu sählig lagernden Schichten bestimmen lokale Inhomogenitäten im Gestein und das Bohrregime wahrscheinlich mehr als die Schichtung die Bohrlochabtauchrichtung.

Ein systematisches Drehen der Bohrlochabtauchrichtung bei großer Bohrlochneigung hat in der Regel folgende Ursache:

- Ändert sich die Richtung des Schichteinfallens infolge einer Winkeldiskordanz sprunghaft, so kann sich die Bohrkrone nicht augenblicklich auf die plötzlich in eine andere Richtung einfallende Schichtung einstellen. Sie benötigt dazu eine Strecke, deren Länge vor allem von der Größe des Diskordanzwinkels, aber auch von der Bohrfähigkeitsanisotropie des Gesteins und dem Bohrregime abhängt. Diese Strecke ist besonders lang, wenn man mit Hilfe von Schwerstangen und Stabilisatoren sowie der Verkleinerung des Sohlendruckes versucht, keine Knicke (dog legs) in der Bohrung entstehen zu lassen, und eine nur wenig biegbare Rohrtour einsetzt. In der Bohrung VIII benötigte die Bohrkrone nach dem Durchteufen der Rotliegendeffusia 100 m, um sich den Lagerungsverhältnissen des Siles anzupassen. Sie führte während dieser Anpassung eine Drehung von 80° aus, um danach konstant in eine Richtung abzutauchen (s. Abb. 27c).

Das Azimut der BA wird nicht nur durch die Raumlage von Schichtung und Schieferung beeinflusst, sondern ebenso durch Störungszonen und wahrscheinlich auch durch die Klüftung. So zeigt die BA in der Bohrung IX eine markante Veränderung, nachdem die Bohrung eine deutlich ausgeprägte Störungzone durchteufte.

Zusammenfassend ergibt sich, daß die Bohrlochabtauchrichtung vor allem durch die Schichteinfallrichtung bestimmt wird. Dies trifft sowohl in germanotyp schräggestellten als auch in alpinotyp gefalteten Schichten zu. Die Größe der Bohrlochneigung dagegen hängt sowohl vom Schichteinfallen als auch von der Bohrtechnologie ab. Die Bohrlochachse pendelt bei deutlich ausgeprägtem Schichteinfallen im Bereich des Winkels, der von der Vertikalen und der Schichtflächennormalen eingeschlossen wird.

Das Verfahren zur Bestimmung der Schichteinfallrichtung mit Hilfe der BA kann man dort anwenden, wo mehrere hundert Meter mächtige Gesteinsserien in dieselbe Richtung einfallen und wo die Bohrung mit einer Neigung von 5° (4°) und mehr konstant in eine Richtung abtaucht (Bhg. I, III, (IV), V, (VI), VII, VIII, XI). Auf keinen Fall darf vorausgesetzt werden, daß die Schichtflächennormale und die Bohrlochachse in jeder Bohrung prinzipiell in dieselbe Richtung abtauchen. Über die absolute Genauigkeit des Verfahrens kann wegen des Mangels an umfangreichen sicheren Vergleichsdaten für die Bohrlochabweichungsmessungen keine Aussage gemacht werden.

3.3. Orientierung mit Hilfe der Reflexionsseismik

3.3.1. Orientierungsprinzip

Die Raumlage der Schichtung in einer sedimentären Abfolge kann anhand seismischer Tiefenprofile ermittelt werden, wenn

- die Schichtenfolge nur unwesentlich disloziert ist,
- die Reflexionshorizonte schichtparallel verlaufen und
- das Gebiet (Scholle bzw. Teilscholle) durch zwei möglichst senkrecht zueinander angeordnete seismische Profile erkundet ist.

Aus zwei auf einer ebenen Fläche liegenden Linearen kann man nach einem einfachen geometrischen Verfahren (MÖBUS 1970, S. 36) die Raumlage dieser Fläche bestimmen. Der als "Linie dargestellte Reflexionshorizont in einem seismischen Tiefenprofil", der im weiteren als "Reflektor" bezeichnet wird, ist eine solche Lineare. Das Streichen dieses "Reflektors" entspricht der Richtung des seismischen Profils, von N über E gemessen (s. Abb. 21). Das Fallen des "Reflektors" wird aus dem seismischen Tiefenprofil nach (20) ermittelt:

$$(20) \quad \tan \varphi' = \frac{s_1}{s_2} = \frac{\text{Teufendifferenz der Endpunkte des "Reflektors" horizont. Abstand d. Endpunkte des "Reflektors"}}{\left[\frac{m}{m} \right]}$$

Die "Reflektoren" bzw. deren Teilstücke im seismischen Tiefenprofil werden auf Transparentpapier übertragen und die Strecken s_1 und s_2 möglichst genau gemessen. Die Berechnung des Fallens erfolgt dann nach (20).

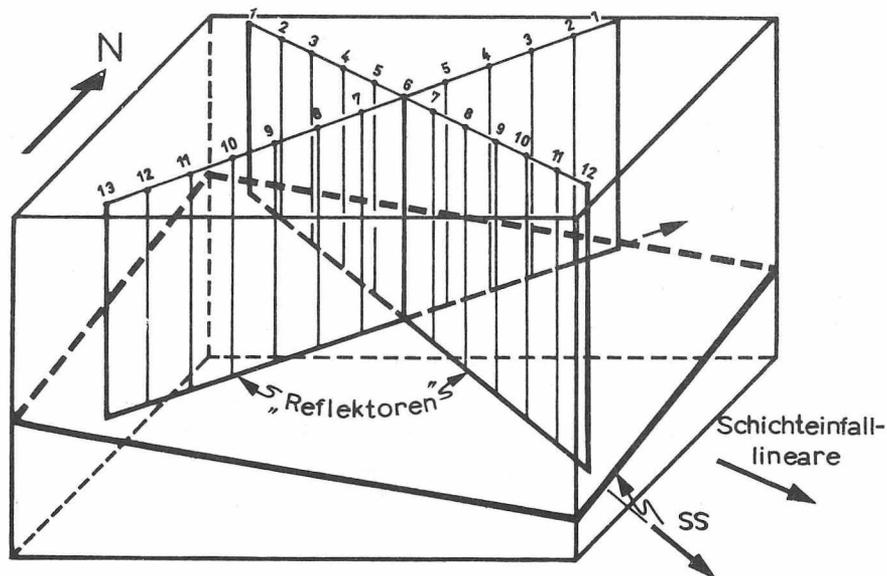


Abb. 21 Lagebestimmung einer Schichteinfalllineare mit Hilfe von zwei seismischen Tiefenprofilen

Das Streichen und Fallen aller zu einem Reflexionshorizont gehörenden "Reflektoren" aus verschiedenen seismischen Tiefenprofilen wird bestimmt, sofern sie in der Umgebung der Bohrung liegen und keine Störung zwischen ihnen und der Bohrung auftritt. Die "Reflektoren" überträgt man als Linearen in die Äquatorialprojektion des SCHMIDT'schen Netzes und konstruiert die Spur (Flächengroßkreis) des Reflexionshorizontes. Damit ist das gesuchte Streichen und Fallen des Reflexionshorizontes ermittelt. Bei der Konstruktion des Flächengroßkreises wird die Güte der "Reflektoren" berücksichtigt (MENNING 1971). In diese Bewertung gehen Aushalten und Sicherheit der "Reflektoren" sowie ihre Entfernung zur Bohrung ein.

3.3.2. Voraussetzungen und Einflüsse

Das Untersuchungsgebiet ist reflexionsseismisch mehrmals intensiv erkundet worden. Der unterschiedliche geologische Kenntnisstand zur Zeit der Projektierung der Profilanlagen der einzelnen Meßgebiete, der entwicklungsbedingte Unterschied in der Meßtechnik und -methodik und teilweise komplizierte Geländebeziehungen bedingen erfahrungsgemäß eine wechselnde Qualität und Gebrauchsfähigkeit der Meßergebnisse. Eine erhebliche Verbesserung der Aussagefähigkeit der Meßergebnisse aus dem Präperm erfolgte mit der Einführung der Digitalseismik.

Die beiden Hauptprobleme der Analogseismik sind:

1. Infolge der in der Regel nur sehr schwer zu eliminierenden Mehrfachreflexionen erhält man zuweilen falsche Vorstellungen von der Lage der Schichten einer Scholle oder sogar eines größeren Gebietes, wie nachfolgende digitalseismische zeigen.
2. Der letzte analogseismisch sicher zu ermittelnde Reflexionshorizont (Z) liegt an der Oberfläche des Basalanhydrits. In der Vergangenheit wurde deshalb oft nur induktiv auf den Bau des tieferen Untergrundes geschlossen.

Das Fallen der Reflexionshorizonte (aus analogseismischen Tiefenprofilen ermittelt) wurde mit dem Fallen am Bohrkern und den mit Hilfe des Stratalogs gemessenen Fallwerten verglichen. Das Fallen nach dem Stratalog stimmt mit dem nach den Messungen am Bohrkern im Mittel gut überein, während die Analogseismik ein systematisch niedrigeres Einfallen liefert. Zur Erklärung dieser Tatsache gibt es mehrere Möglichkeiten:

1. Die Analogseismik liefert in der Regel ein zu niedriges Fallen, weil geophysikalische Grenzen (Reflexionshorizonte) und geologische Grenzen (Schichtflächen infolge weiträumiger Lithofazieswechsel nicht immer identisch sind.
2. Einige vermeintliche Reflexionen des Präechsteins sind Mehrfachreflexionen des sehr flach einfallenden oder sählig lagernden Mesozoikums.
3. Am Kern und mit der Schichtneigungsmessung wird nicht das großflächige Schicht-einfallen erfaßt, sondern die Einfallwerte liegen infolge lokaler Inhomogenitäten (Einfluß von Störungen, nicht erkannte Schrägschichtungsbereiche) zu hoch.

Die systematischen Abweichungen im Einfallen können somit eventuell durch die unterschiedlichen "Aufschlußgrößen" (Bohrung - seismisches Profil) erklärt werden. Die obigen Ursachen wirken wahrscheinlich komplex, wobei entsprechend den örtlichen Verhältnissen die eine oder die andere Ursache überwiegen kann.

3.3.3. Einschätzung der Aussagekraft

Die analogseismisch vorhergesagten Einfallrichtungen im Präzechstein der hier als Test untersuchten 11 Bohrungen wurden mit den mit Hilfe der nachträglichen Bohrkernorientierung ermittelten Einfallrichtungen verglichen. In 6 von 11 Bohrungen sind in den Bereichen, in denen eine nachträgliche Kernorientierung durchgeführt wurde, keine sicheren "Reflektoren" mehr in die seismischen Tiefenprofile eingezeichnet. In zwei Bohrungen fehlen relevante Ergebnisse der nachträglichen Bohrkernorientierung zum Vergleich mit den reflexionsseismischen Angaben. Im Bereich zweier weiterer Bohrungen machte die Digitalseismik eine Revision der analogseismischen Ergebnisse erforderlich, während nur in einer Bohrung die von der Analogseismik ermittelte Einfallrichtung bestätigt werden konnte (Bhg. V). Aus den angestellten Vergleichen ergibt sich:

- Die Digitalseismik ist in den randnahen Bereichen des Norddeutschen Beckens nach den bisherigen Messungen in der Lage, die Schichteinfallrichtungen zumindest im Karbon wahrheitsgetreuer widerzuspiegeln als die Analogseismik. Durch die digitale Auswertung der seismischen Meßergebnisse können Mehrfachreflexionen weitgehend ausgeschlossen werden.
- Die Analogseismik spiegelt sowohl in den zentralen als auch in den Randbereichen des Untersuchungsgebietes die Einfallrichtungen im Präzechstein, wenn überhaupt, nur mit größeren Fehlern wider. Anhand der Analogseismik ist es deshalb nur möglich, allgemeine Angaben über die strukturellen Verhältnisse des Präzechsteins im Untersuchungsgebiet zu machen.

Aus diesen Gründen ist eine sichere nachträgliche Orientierung von Bohrkernen aus dem Präzechstein z.Z. nur in beckenrandnahen Bereichen anhand digitalseismisch ermittelter Ergebnisse möglich.

3.4. Orientierung nach Isobathenkarten und charakteristischen Horizonten

3.4.1. Orientierungsprinzip

Isobathenkarten werden auf der Grundlage der Daten seismischer Profile oder der stratigraphischen Angaben aus Erkundungsbohrungen für gut abgrenzbare, weit aushaltende, mehr oder weniger ungestörte Liegend- oder Hangendgrenzen eines Horizontes gezeichnet.

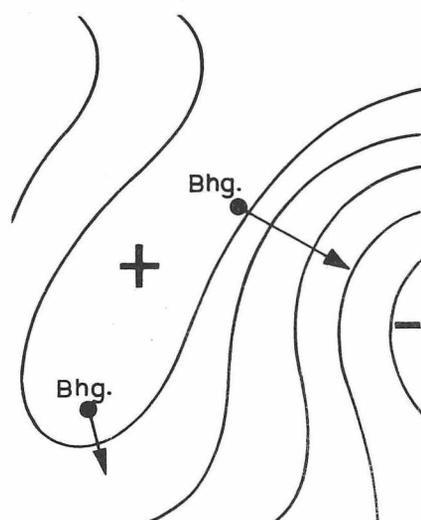


Abb. 22 Schichteinfalllinearen in einer Isobathenkarte

Zur Bestimmung des Streichens und Fallens im Bereich einer Bohrung wird auf der Isobathenkarte die Schichteinfalllineare konstruiert. Sie schneidet den Bohransatzpunkt, steht senkrecht auf den Isolinien und fällt in Richtung zur tieferliegenden Isobathe ein (Abb. 22). Ihre Richtung minus 90° , von N über E gemessen, ist das Streichen der Schicht. Das Fallen erhält man nach (21):

$$(21) \quad \tan \varphi = \frac{s_3}{s_4} = \frac{\text{Differenz der Isolinienbeträge}}{\text{Abstand der Isolinien}} \left[\frac{\text{m}}{\text{m}} \right].$$

Die Raumlage der Schichtung wird ebenfalls mittels direkter Korrelation gleicher Punkte dreier benachbarter Bohrungen bestimmt. Solche gleichen Punkte sind z.B. die Liegend- und Hangendgrenzen charakteristischer Horizonte. Streichen und Fallen eines charakteristischen Horizontes werden ermittelt, indem man die Bohrungen mit Geraden verbindet. Die Richtung der Geraden, von N über E gemessen, entspricht der Richtung von Linearen, die auf der gesuchten Schichtfläche liegen. Das Fallen der Linearen ergibt sich aus (22):

$$(22) \quad \tan \varphi' = \frac{s_5}{s_6} = \frac{\text{Teufendiff. stratigr. Einheit in zwei Bohrungen}}{\text{horizontaler Abstand der zwei Bohrungen}} \left[\frac{\text{m}}{\text{m}} \right].$$

Für alle drei Geraden, die die Bohrungen verbinden, wird auf diese Weise Streichen und Fallen ermittelt. Die Linearen überträgt man in die Äquatorialprojektion des SCHMIDT'schen Netzes und erhält wie in Abschnitt 3.3.1. Streichen und Fallen der Schichtung.

3.4.2. Einschätzung der Aussagekraft

In Isobathenkarten, die auf der Grundlage reflexionsseismischer Messungen erstellt werden, gehen die Fehler der seismischen Erkundung ein. Wie in Abschnitt 3.3.3. gezeigt wurde, spiegelt nur die Digitalseismik in randnahen Bereichen der Norddeutsch-

Polnischen Senke die Raumlage des Präzechsteins mit einiger Sicherheit wider. Eine Orientierung von Präzechsteinbohrkernen mit Hilfe von Isobathenkarten ist deshalb im Untersuchungsgebiet - mit Ausnahme der auf digitaleismischer Grundlage basierenden Karten - nicht möglich. Das Auflösungsvermögen von Potentialfeldkarten (Gravimetrie, Magnetik) ist zu gering, um mit ihrer Hilfe Bohrkerne orientieren zu können.

Wenn ein mit mindestens drei Bohrungen erkundeter Schichtkomplex in sich ungestört oder nur unwesentlich disloziert lagert (Abb. 23/1), bilden die stratigraphischen Angaben dieser Bohrungen ein zuverlässiges Ausgangsmaterial für die Bohrkernorientierung. In dem variszisch bruchtektonisch stark beanspruchten Präzechstein der Norddeutsch-Polnischen Senke liegen zwischen den Bohrungen in den meisten Fällen Störungen, über deren Charakter wenig oder nichts bekannt ist. Durch die direkte Korrelation gleicher Punkte in drei Bohrungen entstehen deshalb leicht bedeutende Fehler bei der Ermittlung der Raumlage der Schichtung. Abb. 23 belegt diese Feststellung. Es ist zu sehen, daß trotz vier verschiedener Strukturpläne zwei Bohrungen einen Horizont (gestrichelt) bei jeweils derselben Teufe antreffen können. Zwangsläufig kann dieses Verfahren zur nachträglichen Kernorientierung in einem Gebiet wie dem untersuchten nicht zum Erfolg führen, wenn im Mittel die Abstände der Störungen erheblich geringer sind als die der Bohrungen. Weiterhin fehlen im Untersuchungsgebiet gut abgrenzbare, charakteristische Horizonte, so daß dieses Verfahren zur Bohrkernorientierung ausscheidet.

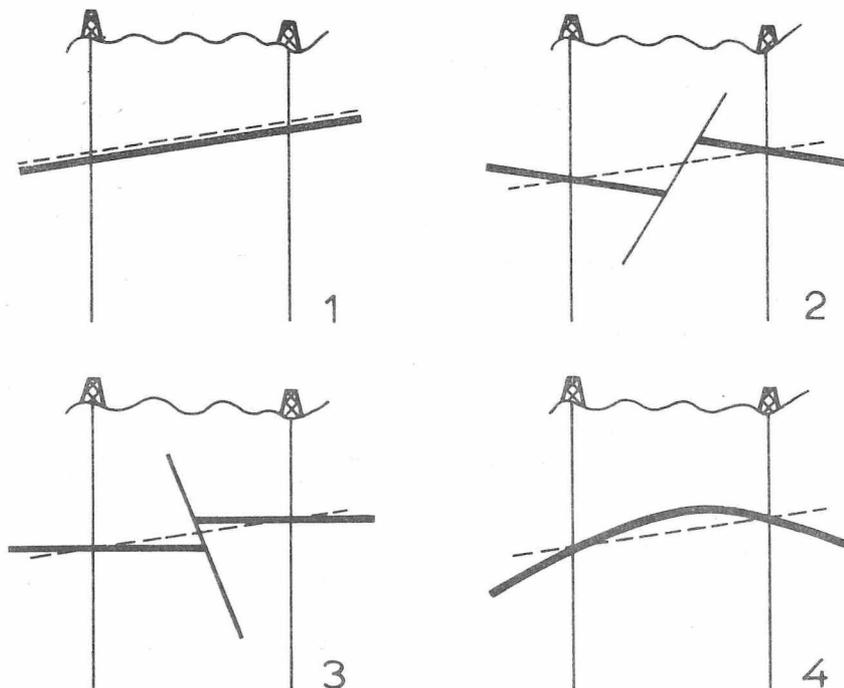


Abb. 23 Ermittlung der Schichteinfallrichtung durch direkte Korrelation entsprechender Punkte dreier Bohrungen (hier vereinfacht mit zwei Bohrungen dargestellt). In einem dislozierten Sedimentkomplex führt diese Methode zu Irrtümern (2 - 4)

3.5. Orientierung mit Hilfe des Schnitteffekts am Bohrkern

3.5.1. Orientierungsprinzip

In einer in sich ungestörten Schichtenfolge werden infolge des Schnitteffekts einer gekrümmt abtauchenden Bohrung an den Bohrkernen unterschiedliche Winkel α zwischen den Schichteinfalllinearen und der Bohrkernwand gemessen ($\alpha = 90^\circ$ - Fallen am Kern). Aus diesen Winkeln α und der Abtauchrichtung der Bohrlochachse kann man mit Hilfe des SCHMIDT'schen Netzes Streichen und Fallen des Anstehenden ermitteln (LENK 1964). Voraussetzungen für die Anwendbarkeit des Verfahrens sind ein parallelgeschichteter, in sich ungestörter Schichtkomplex und eine deutliche Änderung des Azimuts der Bohrlochabweichung bei einer Bohrlochneigung von mehreren Grad.

Die Raumlage der Schichtung im Anstehenden wird ermittelt, indem man den Winkel α zwischen Bohrkernwand und Schichteinfalllineare mißt, während die Bohrlochmessung die BA bestimmt. In eine Oleate, die auf der Äquatorialprojektion des SCHMIDT'schen Netzes liegt, trägt man die Abtauchrichtung der Bohrung als Lineare ein (MÖBUS 1970). Um den erhaltenen Durchstoßpunkt der Bohrlochachse in der unteren Lagehalbkugel dreht man den Winkel α . Zu diesem Zweck ist der Durchstoßpunkt der Bohrlochachse auf einen Großkreis zu drehen, auf dem nach N und S im Abstand von α Punkte eingetragen werden. In gleicher Weise verfährt man auf allen anderen Großkreisen, auf die sich der Durchstoßpunkt der Bohrlochachse drehen läßt. Durch Verbinden der erhaltenen Punkte ergibt sich eine Rotationskurve (LENK 1964).

Für mindestens drei Teufenabschnitte mit unterschiedlichen Bohrlochabtauchrichtungen werden Rotationskurven konstruiert. Der Großkreis, der alle Rotationskurven berührt, entspricht der Lage der Schichtung im Anstehenden.

3.5.2. Einschätzung der Aussagekraft

Wie zahlreiche von mir untersuchte synthetische Beispiele beweisen, kann dieses Orientierungsverfahren die Schichteinfallrichtung genau wiedergeben. Man erhält auch dann noch relativ sichere Ergebnisse, wenn die Winkel α ($\alpha = 90^\circ$ - Einfallen am Kern) leicht von den theoretischen Werten abweichen. Unbefriedigende Ergebnisse des Verfahrens resultieren deshalb nicht aus einer unsauberen Konstruktion der Rotationskurven und Ungenauigkeiten des SCHMIDT'schen Netzes. Das Verfahren wird in der Praxis vielmehr nicht angewendet, weil sich die beiden unabdingbaren Voraussetzungen - eine mächtige, parallelgeschichtete und in sich ungestörte Sedimentabfolge und eine gekrümmte Bohrung bei einer Bohrlochneigung von mehreren Grad - im Normalfall gegenseitig ausschließen.

In einem ungestörten Schichtkomplex taucht eine Bohrung konstant in eine Richtung ab (s. 3.2.). Andererseits entsteht die benötigte Azimutänderung des Bohrloches in den meisten Fällen infolge veränderter Lagerungsverhältnisse (s. 3.2.). Daraus folgt, daß eine Kopplung der beiden genannten Voraussetzungen nur in Sonderfällen auftreten kann, und zwar wenn

- die Bohrkronen in eine mächtige, in sich ungestörte Gesteinseinheit eindringt, die eine wesentlich andere Raumlage als die bereits durchteufte Schicht hat; dann entsteht infolge der Anpassung der Bohrkronen an die neuen Lagerungsverhältnisse eine Azimutänderung des Bohrloches in dem in sich ungestörten (liegenden) Gesteinskomplex in Verbindung mit einer relativ großen Bohrlochkrümmung;
- in einem in sich ungestörten Schichtkomplex eine Ablenkung gebohrt wird, wobei in diesem Falle die dritte benötigte Bohrlochabtauchrichtung dadurch entsteht, daß sich die Bohrkronen nach erfolgter Ablenkung allmählich wieder den strukturellen Verhältnissen anpaßt.

Das Verfahren zur Bohrkernorientierung mit Hilfe des Schnitteffekts wurde anhand der 11 untersuchten Bohrungen getestet. Auf Grund geringer Bohrlochneigungen oder kleiner Azimutänderungen der BA oder des nicht sicher zu messenden Schichteinfallens (Schrägschichtung, undeutliche oder wellige Schichtung, gestörte Lagerung) schieden 8 von 11 Bohrungen für eine Bearbeitung mit Aussicht auf eindeutige Ergebnisse von vornherein aus. In den verbleibenden Bohrungen konnte trotz intensiver Untersuchungen nur für eine Bohrung die Raumlage der Schichtung sicher bestimmt werden. Daraus folgt, daß eine Bestimmung von Streichen und Fallen im Präzessionsstein der Norddeutsch-Polnischen Senke mit Hilfe des Schnitteffekts am Bohrkern nur in Ausnahmefällen zum Erfolg führt.

Das Verfahren zur Kernorientierung mit Hilfe des Schnitteffekts besitzt nur in jenen Bohrungen Aussicht auf Erfolg, in denen das Fallen am Kern einheitliche Werte aufweist und es sich bei einer Azimut- oder Neigungsänderung der Bohrung deutlich systematisch ändert.

4. Vergleich der Ergebnisse der Orientierungsverfahren

4.1. Ermittlung des mittleren Streichens und Fallens

Um die Raumlage der Schichtung im Bereich einer Bohrung zu bestimmen, vergleicht man die Schichteinfalllinearen, die anhand der paläomagnetischen Kernorientierung, der Schichtneigungsmessung, der BA, der Rx-Seismik und des Schnitteffekts gewonnen wurden, und faßt sie zur mittleren Schichteinfallrichtung zusammen. Dieses Ziel kann man auf zwei Wegen erreichen:

1. Die mittleren Schichteinfalllinearen der einzelnen Orientierungsverfahren werden in die Äquatorialprojektion des SCHMIDT'schen Netzes eingetragen. Anschließend konstruiert man den Schichtflächengroßkreis unter Berücksichtigung der Aussagekraft der einzelnen Verfahren. Diese Methode ist günstig, wenn die Schichteinfalllinearen eng konzentriert sind.
2. Die mittlere Schichteinfallrichtung in einer Bohrung wird mit Hilfe einer gewichteten Mittelwertbildung berechnet und als Pfeil in die Polarprojektion des SCHMIDT'schen Netzes eingetragen (Abb. 24).

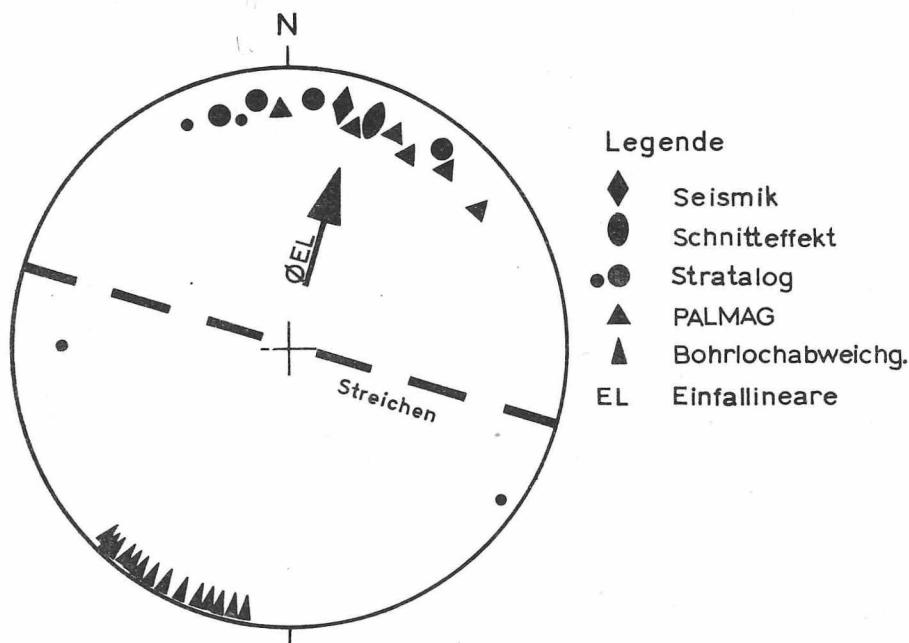


Abb. 24 Sammeldiagramm zur Ermittlung der mittleren Schichteinfallrichtung

Eine gewichtete Mittelwertbildung ist von der subjektiven Einschätzung des Bearbeiters über die Aussagekraft der einzelnen Orientierungsverfahren in der jeweiligen Bohrung abhängig. Weiterhin ist es kompliziert bzw. nicht möglich, für einen gewichteten Mittelwert Vertrauensgrenzen zu berechnen. Trotz dieser Nachteile mußte hier auf die gewichtete Mittelwertbildung zurückgegriffen werden, weil

- die 5 Orientierungsverfahren entsprechend der mit ihnen zu erreichenden Genauigkeit, der geologischen Situation und dem Umfang der Untersuchungen von Bohrung zu Bohrung stark unterschiedliche Aussagekraft haben und eine arithmetische Mittelwertbildung deshalb nicht möglich ist,

- eine Mittelwertbildung nur vorgenommen werden darf, wenn sich die Vertrauensgrenzen der mittleren Einfalllinearen der 5 Orientierungsverfahren überlappen. Da sich in einigen Fällen keine Vertrauensgrenzen berechnen lassen (vor allem Rx-Seismik, Schnitteffekt, Stratalog), kann man nicht in jedem Falle entscheiden, ob die Schichteinfalllinearen signifikant differieren oder nicht.

Das Gewicht (Aussagekraft) eines Verfahrens richtet sich nach der Anzahl der Korrelationen (Stratalog), Rotationskurven (Schnitteffekt) und Proben (Paläomagnetismus), nach der Güte der Reflektoren (Rx-Seismik), nach der Neigung und der Richtungskonstanz der BA sowie nach der Homogenität der Werte jedes Verfahrens. Eine gewichtete Mittelwertbildung unter Berücksichtigung aller dafür wesentlichen Faktoren scheint mir trotz der nicht zu berechnenden Vertrauensgrenzen günstiger zu sein als eine arithmetische mit ungleichwertigen Ausgangsdaten. Zusätzlich geben optisch ausgewogene Sammeldiagramme, in die alle Einzelwerte der 5 Verfahren eingetragen werden, einen guten Überblick über die Variationsbreite der Schichteinfalllinearen und damit über die Aussagekraft der mittleren Schichteinfallrichtung. Abb. 24 zeigt ein Beispiel.

Im Untersuchungsgebiet ist die Aussagekraft der Verfahren, grob verallgemeinert, wie folgt einzustufen:

| <u>Verfahren</u> | <u>Gewicht [Punkte]</u> |
|------------------------|-------------------------|
| Paläomagnetismus | 5 |
| Schichtneigungsmessung | 5 |
| BA >5 (4) ^o | 3 |
| BA <5 (4) ^o | 1 |
| Analogseismik | 1 |
| Digitalseismik | 2 |
| Schnitteffekt | 1 |

Diese Wertigkeit darf nicht schematisch auf jede Bohrung übertragen werden, da sie von den geologischen Verhältnissen und dem Umfang der Untersuchungen in den einzelnen Bohrungen abhängig ist.

4.2. Beispiele aus Bohrungen

4.2.1. Bohrung XI

Diese Bohrung durchteufte eine mächtige Schichtenfolge des Siles, in der die klastischen Komponenten gegenüber den karbonatischen sehr stark überwiegen. Aus dem Siles wurden 8 Proben, vorwiegend Siltsteine mit einem Fallen am Kern zwischen 9° und 20°, die über einen Teufenbereich von fast 2300 m verteilt sind, zur paläomagnetischen Kernorientierung entnommen. Mit Ausnahme der Probe 110 haben alle Parallelschichtung und ebene Schichtflächen.

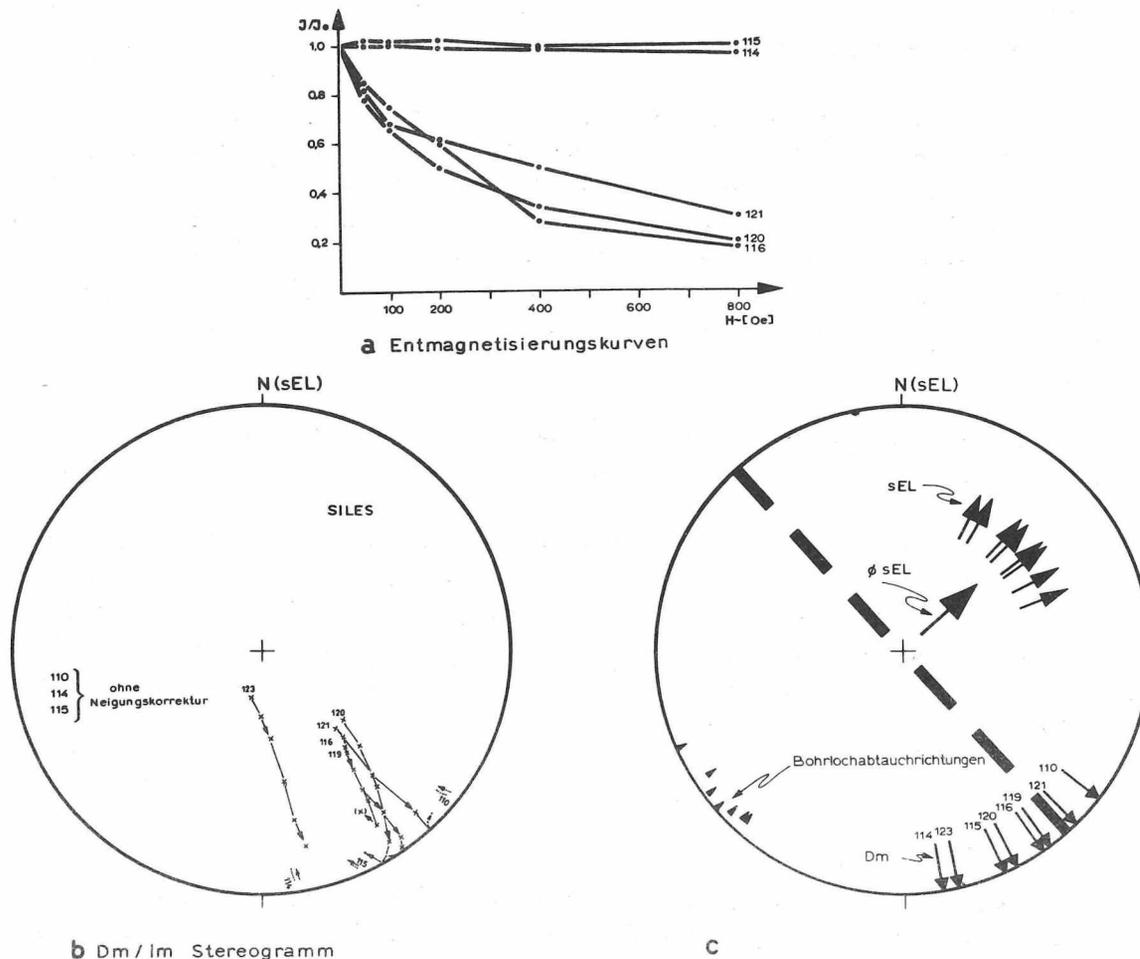


Abb. 25 Bohrkernorientierung Bohrung XI (Siles)

Probe 110 ist ein deutlich schräggeschichteter roter Mittelsandstein mit einer postsedimentären Chemoremanenz (Nachweis siehe 2.6.2.1.). Auch die Proben 114 und 115 haben entsprechend den Entmagnetisierungskurven (Abb. 25a) eine CRM, während die liegenden grauen Proben eine DRM tragen. Bei der Wechselfeldentmagnetisierung werden die positiven Inklinationen deutlich kleiner, die negativen größer (Abb. 25b). Das beweist, daß die Kerne richtig Kopf-Krone-orientiert sind. Nach der Entmagnetisierung haben die Proben eine Inklination zwischen $+20$ und -11° . Diese niedrige Inklination zeigt eine äquatornahe Lage des Untersuchungsgebietes zur Entstehungszeit der charakteristischen Remanenz an.

Obwohl die Proben knapp 2300 m auseinanderliegen, die hangenden eine CRM und die liegenden eine DRM haben, weisen alle etwa dieselbe Einfallrichtung (NE) auf (Abb. 25c). Diese außerordentlich gute Konzentration der paläomagnetisch ermittelten Schichteinfallrichtungen der Proben ist zurückzuführen auf

- die tektonisch weitgehend ungestörte Lagerung des Siles,
- das relativ große Schichteinfallen im Anstehenden (ca. 20°) und am Bohrkern ($9 - 20^\circ$) in Verbindung mit Parallelschichtung und ebenen Schichtflächen,
- die konstante Bohrlochabtauchrichtung,
- die homogene und paläomagnetisch stabile NRM der Proben.

Die Reflexionsseismik und der Schnitteffekt am Bohrkern gestatten keine Aussage zur Raumlage der Schichtung. Das Stratalog ergab keine relevanten Ergebnisse.

Genau entgegengesetzt zur paläomagnetisch ermittelten Schichteinfallrichtung (NE) taucht die Bohrung im Siles mit einer Bohrlochneigung bis zu 10° richtungskonstant nach SW ab und zeigt damit ein deutliches ($\cong 10^\circ$) Einfallen nach NE an (Abb. 25c). Wegen der besseren Anschaulichkeit ist in Abb. 25c die Neigung der BA an der Peripherie des Kreises gleich 0° und in seinem Mittelpunkt gleich 90° gesetzt, umgekehrt zur üblichen Darstellung. Dasselbe gilt auch für die Bohrungen V und VIII. Das Einfallen der paläomagnetisch orientierten Proben ist in Abb. 25c dagegen nicht berücksichtigt.

Zur Ermittlung der Schichteinfallrichtung des Siles stehen somit die Ergebnisse der paläomagnetischen Bohrkernorientierung und der BA, die ausgezeichnet übereinstimmen, zur Verfügung. Beide Orientierungsverfahren zeigen bei der sehr guten Konzentration der paläomagnetisch ermittelten Schichteinfalllinearen der Proben bzw. der konstanten Bohrlochabtauchrichtung bei großer Bohrlochneigung eine Schichteinfallrichtung mit 50° nach NE an (Abb. 25c). Aus der Addition des Schichteinfallens am Kern und der Bohrlochneigung erhält man das wahre Fallen, das zwischen 15° und 25° schwankt und im Mittel bei 20° liegt. Das Siles der Bohrung XI streicht somit 320° ($\pm 10^\circ$) und fällt im Mittel mit ca. 20° nach NE ein.

4.2.2. Bohrung V

In der auf der Insel Rügen gelegenen Bohrung V wurde eine fast 2000 m mächtige Unterkarbonfolge in Kohlenkalkfazies angetroffen (SCHMIDT & FRANKE 1975, S. 841). Das graue, vorwiegend mergelig-kalkige Dinant ist deutlich rhythmisch gegliedert und wurde ausschließlich marin gebildet.

Aus dem Visé und Tournai wurden 5 tonige bzw. siltige Mergelsteine bzw. mergelige Siltsteine mit ebenen bis leicht welligen Schichtflächen aus vorwiegend parallelschichteten Bereichen mit einem Fallen am Kern zwischen 5° und 13° zur paläomagnetischen Kernorientierung entnommen. Alle Proben haben eine DRM, die trotz der geringen Intensität homogen bis nahezu homogen ist (α_{95} zwischen 4° und 13° , im Mittel 7°). Während der Entmagnetisierung nimmt die Inklination der Proben bis 200 bzw. 400 Oe deutlich ab und wird von da an wieder größer (Abb. 26a). Dieser Effekt kann nicht erklärt werden. Die Inklination liegt bei 200 Oe zwischen $+25^\circ$ und $+70^\circ$. Damit zeigt sie eine relativ weit vom Äquator entfernte Lage des Untersuchungsgebietes im Dinant an. Das stimmt mit den in den anderen Bohrungen gesammelten Erkenntnissen über eine äquatornahe Position des Gebietes der Nordostdeutschen Senke im Dinant nicht überein. Entweder ist der größte Teil der NRM eine gegenüber der Wechselfeldentmagnetisierung relativ stabile IRM (siehe auch 2.6.1.1.), oder der Nichtdipolanteil des Erdmagnetfeldes war während des Dinants infolge der variszischen Tektogenese sehr groß und verursachte die anormal hohe Inklination. Die Deklination der Proben ändert sich während der Entmagnetisierung relativ wenig. Die Einfalllinearen der 5 Proben liegen in einem Winkelbereich von 90° (Abb. 26a) und zeigen eine mittlere Schichteinfallrichtung nach NNE an.

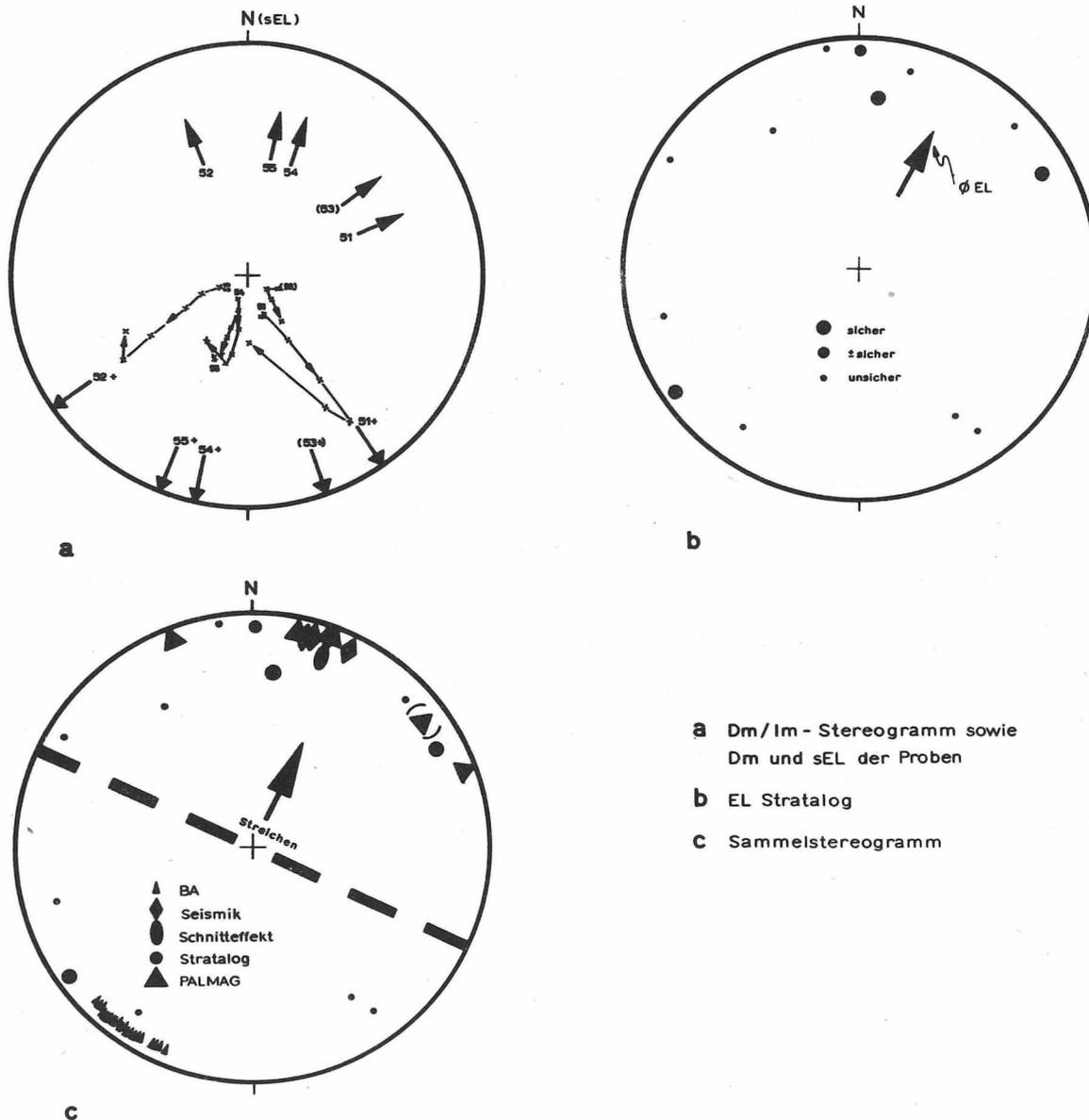


Abb. 26 Bohrkernorientierung Bohrung V (Dinant)

Die im Tournai und Devon durchgeführten Schichtneigungsmessungen geben eine mittlere Einfallrichtung nach NNE an (Abb. 26b). Die anhand von analog- und digitaleismischen Messungen konstruierten reflexionsseismischen Tiefenprofile, die quer zum Streichen liegen, zeigen in diesem Gebiet für Dinant und Devon ein relativ starkes Schichteinfallen nach NNE an (Abb. 26c). Auch die Bohrlochabweichung und das Verfahren zur Raumlagebestimmung der Schichtung mit Hilfe des Schnitteffekts am Bohrkern ergeben eindeutig eine Schichteinfallrichtung nach NNE.

Da alle Orientierungsverfahren dieselbe Schichteinfallrichtung nachweisen, ist an dem Streichen des Unterkarbons in WNW-ESE-Richtung und an der nordnordöstlichen Einfallrichtung nicht zu zweifeln.

4.2.3. Bohrung VIII

Die Bohrung VIII schloß unter effusivem Autun variszisch gefaltetes Namur auf. Das Profil des Namur besteht vorwiegend aus Fein- und Mittelsandsteinen, die z.T. eine typische Wechsellagerung bilden. Die ungeschieferten Gesteine sind stark verfestigt. Das Einfallen der Schichtung wechselt stark und schwankt zwischen 15° und 90° . Der hangende rote Teil der Schichten wurde posttektonisch durch vadose Wässer oxydiert (MEISSNER 1972).

Aus diesem Bereich wurden vier und aus dem grauen Bereich eine Probe paläomagnetisch untersucht. Die Proben 81 - 83 haben eine physikalisch und paläomagnetisch stabile sowie homogene ($\alpha_{95} = 2^{\circ}$) CRM (Abb. 27a), deren Deklination vor der Neigungskorrektur maximal um 10° dreht, nach der Korrektur um maximal 2° . Dieses verminderte Drehen der Deklination beweist die Anwesenheit einer schwachen, steil orientierten IRM in den Proben, die wahrscheinlich infolge des Bohrprozesses entstand. Nach der Neigungskorrektur liegt die Inklination der Proben bei -25° bis -30° . Sie zeigt damit eine paläogeographische Breite von ca. 15° an.

Die Differenzen im Schichteinfallen zwischen den Proben 81 - 83 sind zu klein, als daß man mit Hilfe der Neigungskorrektur Aussagen über das Alter der CRM machen kann. Nach MEISSNER (1972) und entsprechend den analogen Verhältnissen der Bohrung III ist es wahrscheinlich, daß die CRM nach der Faltung entstand. Für die Genauigkeit der Bohrkernorientierung ist es aber unwesentlich, ob die CRM prä- oder posttektonisch entstand, da sich die mittleren Deklinationen der Proben vor und nach der Neigungskorrektur nur unwesentlich unterscheiden (s. Anlage 1). Das Verhalten der Remanenz der Probe 85 ist nicht zu klären. Die Probe stammt aus dem Bereich einer Störung und kann paläomagnetisch nicht orientiert werden. Probe 86 besteht aus dunkelgrauem Feinsandstein und trägt eine inhomogene Remanenz, so daß sie zur paläomagnetischen Kernorientierung nicht geeignet ist.

Zur Raumlagebestimmung der Schichtung können deshalb nur die Proben 81 - 83, die über einen Teufenbereich von 100 m verteilt sind, verwendet werden. Die BA beeinflusst die paläomagnetische Kernorientierung nicht, da sEL und EL wegen des großen Schichteinfallens nur minimal differieren können. Die Remanenzrichtungen der Proben 81 - 83 liegen innerhalb eines Bereiches von 10° (Abb. 27b). Die mittlere Schichteinfallrichtung ergibt sich daraus bei einem silesischen Alter der charakteristischen Remanenz zu 321° nach NW.

Eine Schichtneigungsmessung wurde nicht durchgeführt, und die Rx-Seismik sowie das Verfahren zur Raumlagebestimmung der Schichtung mit Hilfe des Schnitteffekts am Bohrkern können zur Klärung der Lagerungsverhältnisse im gefalteten Grundgebirge nicht beitragen.

Die Bohrung taucht im Autun mit 2 - 4° Neigung nach SSW-SW ab. Mit ihrem Eintritt in das Namur beginnt eine markante Drehung der Bohrlochabtauchrichtung gegen den Uhrzeigersinn (Abb. 27c). In einem Bereich von 100 m schwenkt die Bohrung aus der SW- in die SSE-Richtung um und hält diese bis zur Endteufe, wobei die Neigung bis 14° aufbaut. Daraus folgt:

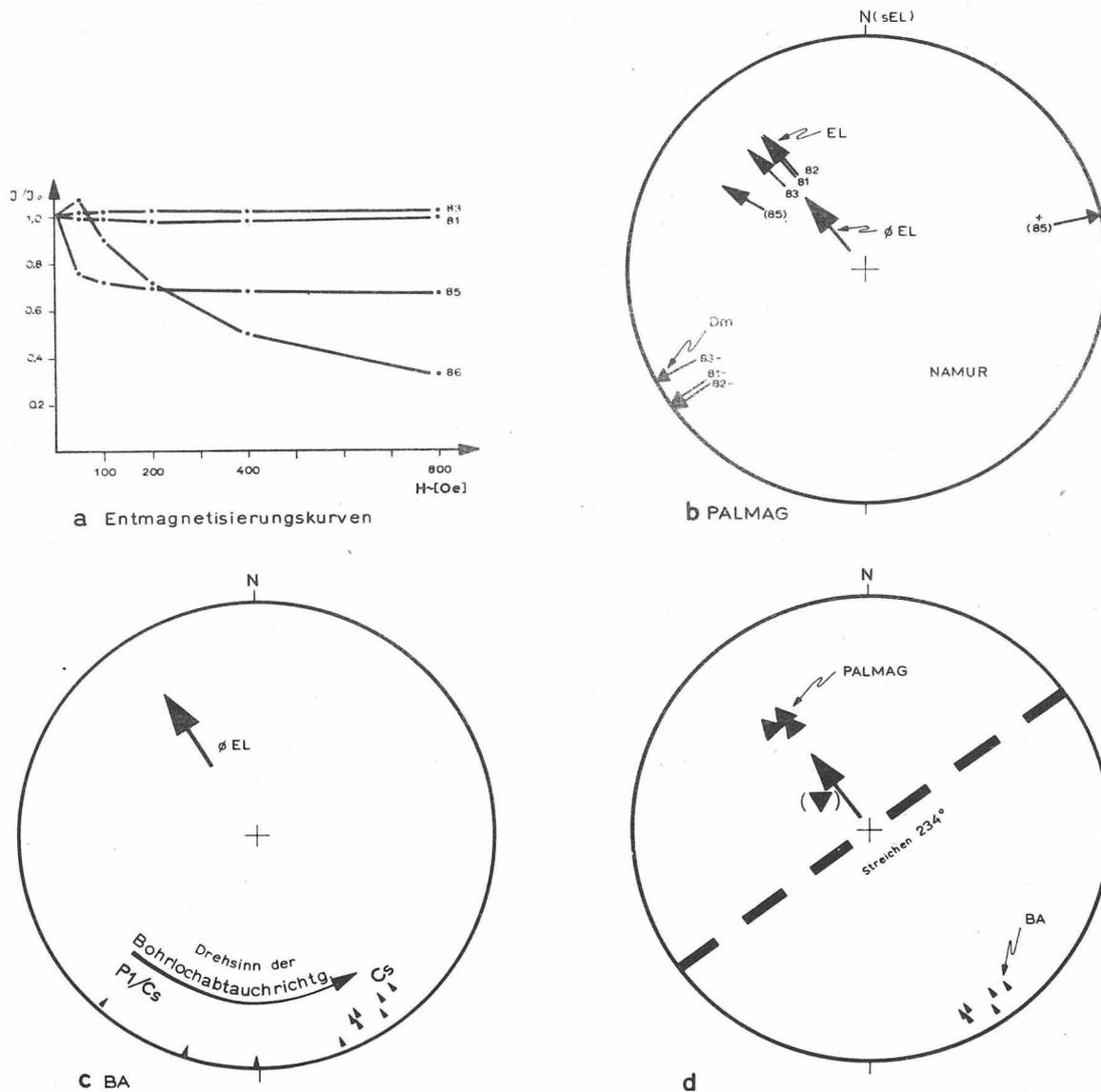


Abb. 27 Bohrkernorientierung Bohrung VIII (Namur)

1. Wie die Bohrung III taucht die Bohrung VIII im effusiven Rotliegenden nach SW ab. Trotz der kleinen, für Rückschlüsse auf die Lagerungsverhältnisse nicht signifikanten Bohrlochneigung ist es wahrscheinlich, daß die Inhomogenitätsflächen (Flächen des Fließgefüges?) im effusiven Autun in beiden Bohrungen nach NE einfallen.
2. Die Krümmung der Bohrung wird durch das Bestreben der Bohrkrone verursacht, sich in der Ebene einzupendeln, die von der Schichtflächennormalen und der Lotrechten aufgespannt wird.
3. Die Bohrkrone benötigt zur Anpassung an die Lagerungsverhältnisse des Namurs einen Teufenbereich von ca. 100 m und taucht danach entgegengesetzt zur Schichteinfallrichtung ab (Abb. 27c).

4. Trotz großer Schwankungen des Schichteinfallens im Anstehenden ist die Streichrichtung des Namurs in der Vertikalen mehr oder weniger konstant.
5. In dem Teufenbereich, in dem die Bohrung nach vollendeter Drehung richtungskonstant abtaucht, muß zum Schichteinfallen am Kern der Betrag der Bohrlochneigung addiert werden, um das wahre Einfallen zu erhalten. Im hangenden Teil des Namurs erhält man letzteres mittels einer Vektoraddition (wie z.B. in Abb. 14).

Die mittlere Schichteinfallrichtung nach der paläomagnetischen Kernorientierung beträgt 321° , nach der BA 328° NW. Daraus ergibt sich eine mittlere Einfallrichtung nach diesen beiden Verfahren von 324° ($+10^{\circ}$) nach NW und ein Streichen von 234° bei einem wechselnden Einfallen zwischen 15° und 90° .

4.3. Empfehlungen zur Raumlagebestimmung des Präzechsteins im Bereich einer Bohrung

Je mehr Kernorientierungsverfahren in einer Bohrung angewendet werden, desto sicherer ist die Raumlage der Schichtung zu ermitteln. Deshalb muß man prinzipiell in jeder Bohrung versuchen, Streichen und Fallen mit allen zur Verfügung stehenden Verfahren zu bestimmen, die Aussicht auf Erfolg haben.

Die Aussagekraft der Orientierungsverfahren ist sehr unterschiedlich und stark von den lokalen geologischen Verhältnissen abhängig. Schnitteffekt am Bohrkern, Rx-Seismik und BA haben nur ein begrenztes Auflösungsvermögen. Mit ihrer Hilfe ist eine Variation der Schichteinfallenebenen in Bereichen bis zu 100 m Mächtigkeit nicht und nur die generelle Einfallrichtung für größere Teufenabschnitte (mehrere hundert Meter) zu bestimmen. Da diese Orientierungsverfahren jedoch alle nur einen geringen Arbeitsaufwand erfordern, sollten sie in jeder Bohrung angewendet werden. Bei komplizierten geologischen Verhältnissen sind nur die Schichtneigungsmessung und die paläomagnetische Kernorientierung in der Lage, relevante Aussagen zu liefern. Deshalb muß zumindest eines dieser Verfahren einer sicheren Raumlagebestimmung der Schichtung zugrunde liegen.

Ist in einer bereits abgeteuften Bohrung zu entscheiden, ob die Raumlage der Schichtung anhand einer Schichtneigungsmessung oder mit Hilfe der paläomagnetischen Bohrkernorientierung durchgeführt werden soll, so muß man berücksichtigen:

1. In grauen feinklastischen bis kalkigen Sedimentiten mit einer ausreichenden Menge ferri- bzw. antiferromagnetischer Minerale und in roten Sedimentiten, in denen das Alter der CARM bekannt ist, führt die paläomagnetische Bohrkernorientierung zum Erfolg.
2. Zeigen die Bemusterung des Kernmaterials und die Bohrlochmessung eine Wechselagerung von hoch- und niederohmigen Gesteinen an und ist an den Kernen ein deutliches Einfallen vorhanden, so ist mittels des Stratalogs unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3.1.2. aufgestellten Vorgaben die Schichteinfallrichtung zu ermitteln.

Tab. 7. Beeinflussung der Orientierungsverfahren

| Art der Beeinflussung | Verfahren | | | | |
|---------------------------------------------------------------|-----------|-----|---------|--------------------|--------|
| | Stratalog | BA | Seismik | Schnitt- effekt | PALMAG |
| Meß- und Auswertefehler | -- | -- | -- | -- | -- |
| Schichteinfallen >10° | + | + | + | + | . |
| Schichteinfallen 5 - 10° | (-) | - | (-) | - | . |
| Schichteinfallen <5° | -- | -- | -- | -- | . |
| Klein- bis großdimensionale Schrägschichtung | -- | - | (?) | -- | -- |
| Ungestörte Lagerung | . | + | + | + | . |
| Leicht gestörte Lagerung | . | - | - | -- | . |
| Keine digitale Aufzeichnung/ungünstige Oberflächenbedingungen | . | . | - | . | . |
| Große Versenkungstiefe | - | . | -- | . | [-] |
| Kavernenbildung | - | - | . | - | . |
| Große, kontinuierliche Bohrlochkrümmung | . | (-) | . | + | . |
| Starker Wechsel der Gesteinsdichte | (?) | + | + | (+) | . |
| Dünnere Filterkuchen | + | . | . | . | . |
| Große Sondendrehung/lange Meßstrecken | - | . | . | . | . |
| Wechselagerung hoch- und niederohmiger Schichten | + | . | . | . | . |
| Große Bohrlochabweichung/großer Bohrdruck | + | + | . | + | [-] |
| Großer Bohrlochdurchmesser | + | + | . | + | + |
| Falsche Kopf-Krone-Orientierung | . | . | . | . | [-] |
| Bohrvorgang/rezentes Erdfeld/PTRM | . | . | . | . | [-] |
| Säkularvariation/Feldinversion | . | . | . | . | [-] |
| Oxydierendes Paläomilieu | . | . | . | . | + |
| Genaues Paläogradnetz | . | . | . | . | + |

Einfluß: + positiv, . nicht wesentlich, - ungünstig, -- sehr ungünstig, () schwach, [] eliminierbar

Auf die paläomagnetische Kernorientierung kann man in jenen Bohrungen verzichten, in denen die Schichteinfallrichtung mit Hilfe des Stratalogs eindeutig bestimmt wurde und die Ergebnisse zumindest eines weiteren Orientierungsverfahrens diese Schichteinfallrichtung bestätigen. In allen anderen Fällen muß man versuchen, die Kerne paläomagnetisch zu orientieren. Das paläomagnetische Verfahren ist das einzige z.Z. bekannte Verfahren zur nachträglich direkten Orientierung von Bohrkernen (s. Tab. 1). Es hat gegenüber den anderen Verfahren die Vorteile,

- daß auch Kerne aus horizontal lagernden Schichten orientiert werden können (z.B. für die Orientierung von Klüften),

- daß man die Raumlage der Schichtung auch in bereits verfüllten Bohrungen bestimmen kann (im Gegensatz zum Stratalog),
- daß Bohrkerne der Systeme Trias bis Devon mit einer Genauigkeit zwischen $\pm 10^\circ$ und $\pm 20^\circ$ zu orientieren sind,
- daß mit ihm auf Grund der geologischen und geophysikalischen Eigenschaften der triassischen, permischen, karbonischen und devonischen Sedimente und ihrer Lagerungsverhältnisse in der Norddeutsch-Polnischen Senke Bohrkerne in weit größerem Umfang orientiert werden können als mit den anderen Verfahren zur nachträglichen Bohrkernorientierung.

Aus diesen Gründen und wegen der Rentabilität des paläomagnetischen Verfahrens (s. Abschnitt 4.4.) sollte dieses in Zukunft verstärkt angewendet werden.

In Tab. 7 sind die wesentlichen Faktoren aufgeführt, die die Verfahren zur nachträglichen Bohrkernorientierung beeinflussen. Anhand dieser Aufstellung und entsprechend den lokalen Gegebenheiten im Bereich einer Bohrung kann man abschätzen, welche Verfahren sich zur nachträglichen Kernorientierung eignen und welche von vornherein keine Aussicht auf Erfolg haben.

In den untersuchten Bohrungen wurde die Aussagekraft der einzelnen Orientierungsverfahren eingeschätzt (Tab. 8). Die Aussagekraft der BA, des Schnitteffekts am Bohrkern und der Rx-Seismik ist im Bereich der bearbeiteten Bohrungen selbst bei intensivsten Untersuchungen nur noch wenig zu verbessern. Mittels eines umfangreicheren Meßprogramms hätte die Schichtneigungsmessung in einigen der bearbeiteten Bohrungen detailliertere Ergebnisse als die vorliegenden liefern können. Da die Bohrungen bereits alle verrohrt sind, ist es jedoch allein noch mit Hilfe der paläomagnetischen Orientierung weiterer Proben möglich, wesentliche neue Ergebnisse (Streichen und Fallen, Orientierung der Klufscharen) zu gewinnen.

Aus Tab. 8 geht hervor, daß in den untersuchten Bohrungen die paläomagnetische Kernorientierung, gefolgt von der BA, die umfangreichsten Aussagen zum Streichen und Fallen lieferte. Deshalb basieren auch in den meisten Bohrungen sichere Ergebnisse auf einer Kombination der Schichteinfallrichtungen nach der paläomagnetischen Kernorientierung und der BA. Die paläomagnetische Kernorientierung führte nur dort nicht zum Erfolg, wo die Zahl der untersuchten, paläomagnetisch stabilen Proben für eine sichere Aussage zu klein war bzw. die Richtung des Paläomeridians unsicher ist (Bhg. IV).

Tab. 8. Aussagekraft der Orientierungsverfahren in den untersuchten Bohrungen

| Bohrung Strat. | Stratalog | BA | Rx-Seismik | Schnitteffekt | Paläomagn. | Punkte-Summe |
|----------------|-----------|------|------------|---------------|------------|--------------|
| Max. Punkte | 5 | 3 | 2 | 1 | 5 | 16 |
| I Cs | 0 | 3 | 0 | 1/2 | 3 | 6,5 |
| II Cs | - | 0 | 1 | 0 | 2 | 3 |
| II Cd/D3 | 4 | 0 | 1/2 | 0 | 1/2 | 5 |
| III Cd | - | 2 | 0 | 0 | 3 | 5 |
| IV O | 3 | 1 | 0 | 0 | 1 | 5 |
| V Cd | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 10 |
| VI P1 | - | 1 | 0 | 1/2 | 1/2 | 2 |
| VII Cd | () | 3 | 2 | 0 | 4 | 9 |
| VIII Cs | - | 3 | 0 | 0 | 3 | 6 |
| IX Cd | + | 0 | - | 0 | 1 | 1 |
| X Cd | 1/2 | 0 | 2 | 0 | 1/2 | 4 |
| XI Cs | 0 | 3 | - | 0 | 5 | 8 |
| Ges. Punkte | 8,5 | 19,0 | 7,5 | 2 | 26,5 | 63,5 |

() + fehlerhafte bzw. unterbliebene Auswertung

4.4. Ökonomischer Aufwand der Orientierungsverfahren

In Tab. 9 sind die Zeiten angegeben, die man für die einzelnen Arbeitsgänge einer routinemäßigen Bohrkernorientierung benötigt. Um die Raumlage der Schichtung in einer Bohrung mit Hilfe des Stratatalogs (Einfalllinearen bereits berechnet), der Rx-Seismik (seismische Tiefenprofile schon konstruiert), der BA (Azimut und Neigung bereits tabelliert) und des Schnitteffekts am Bohrkern zu bestimmen, genügen auch unter ungünstigen Umständen 5 Tage je Orientierungsverfahren, im allgemeinen 2 bis 3 Tage (s. Tab. 9), da bereits aufbereitete Daten bzw. schon vorhandene geophysikalische Messungen genutzt werden können.

Die paläomagnetische Kernorientierung, auf die im weiteren eingegangen wird, hat diesen Vorteil nicht. Der Umfang der Arbeiten, die von einem Geologiefacharbeiter ausgeführt werden können, erhöht sich proportional mit der Probenzahl. Etwa proportional zu dieser wachsen auch die Meß- und Rechenkosten (Tab. 9). Der Arbeitsaufwand des Wissenschaftlers pro Bohrung ist dagegen von der Anzahl der untersuchten Proben weitgehend unabhängig und eine mehr oder weniger konstante Größe. Infolgedessen erhöhen sich die Gesamtkosten des paläomagnetischen Verfahrens nicht proportional mit der Probenzahl, sondern verhalten sich annähernd wie folgt:

| n Proben | n Würfel | Kosten [%] |
|----------|----------|------------|
| 15 | 45 | 75 |
| 30 | 90 | 100 |
| 60 | 180 | 150 |

Dieser Finanzanschlag basiert auf einem Selbstkostenaufwand des Betriebes für einen Geologiefacharbeiter von 80 M/Tag und für einen Wissenschaftler von 120 M/Tag. Unter

normalen Bedingungen und bei dem zugrunde gelegten Selbstkostenaufwand muß man für die Raumlagebestimmung des Präzechsteinanteils einer Bohrung bei Anwendung aller dargestellten Verfahren ca. 6500 M veranschlagen. In vielen Bohrungen ist die Raumlage der Schichtung nur mit Hilfe des Paläomagnetismus unter Berücksichtigung der BA zu bestimmen. Unter diesen Voraussetzungen kostet die Bohrkernorientierung (30 Proben à 3 Würfel) ca. 5000 Mark.

Die Untersuchungen zur Raumlage des Präzechsteins im Bereich einer Bohrung der Norddeutsch-Polnischen Senke sind mit einem Aufwand von je ca. 20 Arbeitstagen eines Wissenschaftlers und eines Geologiefacharbeiters sowie 1000 Mark Meß- und Rechenkosten verbunden und kosten ca. 5000 Mark.

Tab. 9. Ökonomischer Aufwand der Orientierungsverfahren

| Verfahren | Art der Arbeit | Bearbeitungstage (ca.) | | Selbstkosten (ca.) | |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|
| | | Wissen- schaft- ler | Geol. Fach- arb. | Wissen- schaft- ler (120 M/d) | Geol. Fach- arb. (80 m/d) |
| PALMAG | Ergebnisbericht einsehen | 1 | - | 120 | - |
| | Beprobieren | 3 | - | 360 | - |
| | 30 Proben à 3 Würfel schneiden (6 Proben = 18 Würfel je Tag) | - | 5 | - | 400 |
| | NRM messen (9 Würfel je Tag) | - | 10 | - | 800 |
| | Neigungskorrektur (6 Würfel je Stunde) | - | 2 | - | 160 |
| | Erzmikroskopie bzw. Röntgenanalyse | 1 | 1 | 120 | 80 |
| | Auswertung | 5 | - | 600 | - |
| | Zeichnarbeiten | - | 2 | - | 160 |
| | Bericht schreiben | 3 | - | 360 | - |
| | Abschlußarbeiten (Organisation) | 5 | - | 600 | - |
| | | Summe | 18 | 20 | 2160 |
| | Kosten für Rockgenerator 60 M/d | | | | 600 M |
| | Rechenkosten ca. 12 M/Probe | | | | 360 M |
| | <u>Gesamtkosten: ca. 4700 M</u> | | | | |
| Stratalog | Ergebnisbericht auswerten (s. 3.1.) | 3 | - | 360 | - |
| | Bericht schreiben | 2 | - | 240 | - |
| | <u>Gesamtkosten: ca. 600 M</u> | 5 | - | 600 | - |
| BA | Tabellierte Bohrlochabtauch- richtungen auswerten | 1 | - | 120 | - |
| | Bericht schreiben | 1 | - | 120 | - |
| | <u>Gesamtkosten: ca. 240 M</u> | 2 | - | 240 | - |
| Rx-Seismik | Ergebnisbericht einsehen | 1 | - | 120 | - |
| | Bestimmung der Schichteinfallrichtung | 1 | - | 120 | - |
| | Bericht schreiben | 1 | - | 120 | - |
| | <u>Gesamtkosten: ca. 360 M</u> | 3 | - | 360 | - |
| Schnitt- effekt | Einfallen am Kern messen | 1 | - | 120 | - |
| | Auswertung | 1 | - | 120 | - |
| | Bericht schreiben | 1 | - | 120 | - |
| | <u>Gesamtkosten: ca. 360 M</u> | 3 | - | 360 | - |

5. Zusammenfassung der Ergebnisse

Bohrkerne können mit Hilfe der Schichtneigungsmessung, der Bohrlochabweichung, der Reflexionsseismik, anhand von Isobathenkarten und charakteristischen Horizonten, mittels des Schnitteffekts am Bohrkern sowie paläomagnetisch orientiert werden. Anwendbarkeit und Aussagekraft dieser Verfahren zur nachträglichen Bohrkernorientierung hängen von der geologischen Situation sowie den geologischen und geophysikalischen Eigenschaften der Gesteine im Bereich einer Bohrung ab.

Mit dem Stratalog ist die Schichteinfallrichtung sicher zu bestimmen, wenn das Schichteinfallen größer als 5° ist und die Bohrlochneigung 1° übersteigt. Wiederholungsmessungen und der Vergleich der gewonnenen Ergebnisse mit dem Kernmaterial schließen Irrtümer hinsichtlich der Schichteinfallrichtung weitgehend aus. Zur Bewertung der Meßwerte des Stratalogs wurde ein Sicherheitsfaktor eingeführt, der sich als qualitatives Kriterium für die Unterteilung der mittleren Schichteinfalllinearen der Meßstrecken gut eignet.

Die Bohrlochabtauchrichtung ist sowohl in ungefalteten als auch in gefalteten Schichten etwa entgegengesetzt zur großräumigen Schichteinfallrichtung orientiert, wenn die Bohrlochachse bei einer Bohrlochneigung von 5° (4°) und mehr über mehrere hundert Meter richtungskonstant abtaucht.

Die Reflexionsseismik spiegelt im allgemeinen geophysikalische Grenzen (Reflexionshorizonte) wider, die u.a. infolge von Mehrfachreflexionen nicht immer mit den geologischen Grenzen (Schichtflächen) übereinstimmen. Eine relativ sichere Orientierung von Bohrkernen des Präzessionssteins ist z.Z. bei analogseismischer Aufzeichnung nicht und bei digitaleismischer nur in randlichen Bereichen der Norddeutsch-Polnischen Senke möglich.

Aus reflexionsseismischen Tiefenprofilen abgeleitete Isobathenkarten enthalten die Ungenauigkeit der Rx-Seismik und eignen sich deshalb gegenwärtig nur in digitaleismisch erkundeten Gebieten zur Bestimmung der mittleren Einfallrichtung. Die Ermittlung der Raumlage der Schichtung mittels Korrelation gleicher stratigraphischer Punkte dreier Bohrungen scheidet in einem Gebiet aus, in dem der Abstand der Störungen in der Regel kleiner als der der Bohrungen ist.

Die Voraussetzungen zur Kernorientierung mit Hilfe des Schnitteffekts am Bohrkern kommen selten gekoppelt vor, so daß dieses Verfahren nur in Ausnahmefällen zum Erfolg führt.

Die sorgfältige Auswahl des geeigneten Bohrkernmaterials entscheidet über den Erfolg der paläomagnetischen Bohrkernorientierung. Zur Kernorientierung eignen sich parallel-, flaser-, linsen- und mikroschräggeschichtete, graue oder rote, tonig-siltig-kalkige Sedimentite. Will man Streichen und Fallen bestimmen, so benötigt man dazu Kerne mit einem deutlichen Einfallen und mehr oder weniger ebenen Schichtflächen. Graue Sandsteine erwiesen sich als paläomagnetisch instabil oder trugen eine inhomogene Remanenz. Rote Sedimentite sind wegen ihrer in der Regel paläomagnetisch stabilen CRM bevorzugt zu beproben, sofern das Alter der CRM bekannt ist.

Die infolge der Probenbearbeitung, der Messung der Remanenz und der Entmagnetisierung entstehenden Kernorientierungsfehler betragen im allgemeinen $0 - 3^\circ$. Mit Hilfe des Programms MAGN kann man die mittlere Remanenzrichtung der Proben berechnen sowie die Vertrauenswürdigkeit dieser Richtungen (α_{95}, k) einschätzen.

Die roten Proben trugen in 90% der Fälle eine paläomagnetisch stabile Remanenz, die gut zu isolieren war, während die DRM der grauen Proben nicht immer vollständig isoliert werden konnte. Die uncharakteristische Remanenz der Bohrkerne setzt sich aus einer erdfeld- und einer bohrprozeßbedingten IRM (VRM) sowie einer PRM und einer PTRM zusammen. Sie ist zum größten Teil bei 100 bis 400 Oe zerstört und behindert dann die paläomagnetische Bohrkernorientierung nicht.

Nach einer Neigungskorrektur können auch Bohrkerne mit einer posttektonischen CARM orientiert werden. Bei bekannter Paläolage des Untersuchungsgebietes auf einer der Paläohalbkugeln und bei eindeutigem Vorzeichen der Inklination der Proben ist es möglich, neben der Streichrichtung auch die Einfallrichtung festzulegen. Sind diese Voraussetzungen nicht erfüllt, so ermittelt man den Einfallsinn der Schichtung mit Hilfe der Bohrlochabtauchrichtung.

Der Einfluß der Säkularvariation auf die Bohrkernorientierung kann durch die Entnahme einer ausreichenden Probenzahl eliminiert werden. Der Überlagerungsdruck beeinflusst die paläomagnetische Bohrkernorientierung nicht, und der Inklinationsfehler wirkt sich nur indirekt über ein ungenaues Paläogradnetz auf die Kernorientierung aus.

Der Einfluß der Bohrlochabweichung auf die Kernorientierung ist mit Hilfe einer Bohrlochabweichungskorrektur zu eliminieren. Kopf-Krone-Vertauschungen, die die Ergebnisse der paläomagnetischen Bohrkernorientierung verfälschen, können mit Hilfe der nach unten gerichteten uncharakteristischen Remanenz der Bohrkerne erkannt werden. Mehr als 80 % der untersuchten Kerne waren auf diese Weise eindeutig Kopf-Krone-orientierbar. Ein Versuch zur Isolierung der DRM in roten Sedimentiten mit Hilfe einer Säurebehandlung verlief negativ.

Die FISHER-Statistik zeigt, daß die Genauigkeit der anhand von Literaturangaben berechneten Paläomeridianrichtungen, die die Genauigkeit der paläomagnetischen Bohrkernorientierung wesentlich bestimmen, im Perm und Siles sehr gut sowie im Dinant und Devon befriedigend ist. Die ermittelten Paläomeridianrichtungen für das Silur und das Ordovizium sind dagegen relativ unsicher.

Prinzipiell sind Bohrkerne bei bekanntem Alter ihrer charakteristischen Remanenz sowohl aus ungefalteten als auch aus gefalteten Schichten paläomagnetisch orientierbar, unabhängig von der Art der CARM und davon, ob diese vor oder nach der tektonischen Beanspruchung erworben wurde.

In permischen, karbonischen und devonischen Schichten mit deutlichem Einfallen ($\cong 10^\circ$) und einer paläomagnetisch stabilen Remanenz reichen 10 Proben (à 3 Würfel) je System bzw. 1000 m Teufe aus, um die Schichteinfallrichtung je nach dem Alter der charakteristischen Remanenz mit einer Genauigkeit zwischen $\pm 10^\circ$ und $\pm 20^\circ$ festzulegen; mit derselben Genauigkeit kann man Kerne ohne Einfallen orientieren (z.B. für die Orientierung von Kluftscharen).

Das Verfahren zur paläomagnetischen Bohrkernorientierung sollte in Zukunft verstärkt genutzt werden, weil für seine Anwendung ausgezeichnete Voraussetzungen bestehen (umfangreiches und paläomagnetisch geeignetes Kernmaterial günstiger Systeme, sicher bekanntes Paläogradnetz für die Systeme Trias, Perm, Karbon und Devon, Hochleistungsrockgenerator, genaue Bohrlochabweichungsmessungen).

Die paläomagnetisch ermittelten Schichtefallrichtungen stimmen mit den nach den anderen Orientierungsverfahren gewonnenen überein. Das beweist, daß die paläomagnetische Kernorientierung zur Raumlagebestimmung der Schichtung gut geeignet ist. In einigen Bohrungen war nur sie gemeinsam mit der Bohrlochabweichung in der Lage, sichere Aussagen zur Raumlage der Schichtung zu liefern. Am sichersten erhält man Streichen und Fallen im Bereich einer Bohrung durch die Kombination der mit Hilfe des Paläomagnetismus, der Schichtneigungsmessung und der Bohrlochabweichung ermittelten Schichtefallrichtungen.

Die Orientierung des Präzechsteinanteils einer Bohrung mittels des Paläomagnetismus (30 Proben à 3 Würfel) und unter Berücksichtigung der Bohrlochabweichung kostet einschließlich der Vorarbeiten und der Interpretation rund 5000 Mark.

Diese Testergebnisse wurden anhand der Untersuchung von 11 Tiefbohrungen im Nordostdeutschen Becken gewonnen.

Literatur

- ANDREEVA, O.L.; BUCHA, V.V.; PETROVA, G.N.: Laboratornaja ocenka magnitnoj stabilnosti gornych porod Cesskogo Massiva. Fizika Zemli, Moskva (1965) 2, S. 54-64
- ANGENHEISTER, G.: Der gegenwärtige Stand der paläomagnetischen Forschung. Geol. Rdsch., Stuttgart 46 (1957), S. 87-99
- ANGENHEISTER, G.: Kolloquium zum Thema: Gesteinsmagnetismus. Z. Geophysik, Würzburg 30 (1964) 1, S. 37-42
- ANGENHEISTER, G.; SOFFEL, H.: Gesteinsmagnetismus und Paläomagnetismus. Berlin, Stuttgart: Bornträger/Dchweizerbort 1972, 110 S.
- APARIN, V.P.; VLASOV, A.Ja.: Nekotorye voprosy istorii geomagnitnogo polja v konce srednego paleozoja i v verchnem paleozoe. In: Nastojasščee i prošloe magnitnogo polja zemli, S. 213-220. Moskva: Nauka 1965
- AS, J.A.; ZIJDERVELD, J.D.A.: Magnetic cleaning of rocks in palaeomagnetic research. Geophys. J. roy. astron. Soc., London 1 (1958), S. 308-319
- AUSTER, V.; WAGNER, F.C.: Zur Konstruktion eines Rockgenerators. Geophysik u. Geol., Leipzig 7 (1965), S. 37-41
- BAGINA, O.L.: K voprosu o proischoždenii estestvennoj ostatočnoj namagničennosti krasnocvetnyh glin Gzel'skogo Jarusa Podmoskovnogo Bassejna. Fizika Zemli, Moskva (1966) 12, S. 82-87
- BENTZ, A.; MARTINI, H.J.: Lehrbuch der angewandten Geologie, 1. Bd., S. 1006. Stuttgart: Enke 1968
- BERSET, G.: Eine Apparatur zur Messung kleiner remanenter Magnetisierungen an Gesteinen (Rock-Generator). Pure and appl. Geophys., Basel 69 (1968), S. 205-228
- BIRKENMAJER, K.; GROCHOLSKI, A.; MILEWICZ, J.; NAIRN, A.E.M.: Palaeomagnetic studies of Polish rocks, II: The Upper Carboniferous and Lower Permian of the Sudetes. Roczn. polsk. Tow. geol., Kraków 38 (1969) 4, S. 435-474
- BIRKENMAJER, K.; NAIRN, A.E.M.: Palaeomagnetic studies of Polish rocks, I: The Permian igneous rocks of the Kraków district and some other results from the Holy Cross Mountains. Roczn. polsk. Tow. geol., Kraków 34 (1964) 1-2, S. 225-244
- BRIDEN, J.C.: A stability index of remanent magnetism. J. geophys. Res., Richmond 77 (1972), S. 1401-1405
- BRIDEN, J.C.; MORRIS, W.A.; PIPER, J.D.A.: Palaeomagnetic studies in the British Caledonides, VI: Regional and global implications. Geophys. J. roy. astron. Soc., Oxford 34 (1973) 1, S. 107-134
- BRIDEN, J.C.; SMITH, A.G.; SALLOMY, J.T.: The geomagnetic field in Permian time. Geophys. J. roy. astron. Soc., Oxford 23 (1971) 1, S. 101-117
- BRODSKAJA, S.Ju.: III. Paleomagnitnaja konferencija. Izv. AN SSSR, Ser. geofiz., Moskva (1960) 7, S. 1091-1096
- BUCHA, V.: Influence of the non-dipole geomagnetic field on dispersion of palaeomagnetic data. Stud. geophys. et geodaet., Praha 8 (1964) 2, S. 195-200
- BUREK, P.J.: Device for chemical demagnetization of red beds. J. geophys. Res., Richmond 74 (1969) 27, S. 6710-6712
- CHLUPAC, I.; KRS, M.: Paläomagnetismus und Paläoklimatologie des Devons. Geologie, Berlin 16 (1967) 8, S. 869-888
- CHRAMOV, A.N.: Paleomagnetizm i stratigrafičeskaja korreljacija. Leningrad: Gostoptechizdat 1958, 218 S.
- CHRAMOV, A.N.; RODIONOV, V.P.; KOMISSAROVA, R.A.: Novye dannye o paleozojskoj istorii zemnogo magnitnogo polja na territorii SSSR. In: Nastojasščee i prošloe magnitnogo polja zemli, S. 206-213. Moskva: Nauka 1965

- COLLINSON, D.W.: Ferrous and ferric iron in red sediments and their magnetic properties.
Geophys. J. roy. astron. Soc., Oxford 16 (1968) 5, S. 531-542
- COLLINSON, D.W.: Investigations into the stable remanent magnetization of sediments.
Geophys. J. roy. astron. Soc., Oxford 18 (1969) 2, S. 211-222
- CORNWELL, J.D.: Palaeomagnetism of the Exeter Lavas, Devonshire.
Geophys. J. roy. astron. Soc., Oxford 12 (1967), S. 181-196
- COX, A.: Geomagnetic reversals.
Science, Washington 163 (1969) 3864, S. 237-245
- COX, A.; OPDYKE, N.: Geomagnetic reversals and long-period secular variation.
U.S. National Report 1967-1971, 15th Gen. Ass. IUGG (Moscow 1971), Washington 1971, S. 210-213
- CREER, K.M.: Palaeozoic palaeomagnetism.
Nature, London 219 (1968), S. 246-250
- CREER, K.M.: The palaeogeography of the Palaeozoic including a discussion of the Lower Devonian geomagnetic field for Europe. In: Palaeogeophysics, ed. by S.K. RUNCORN, S. 185-192.
London: Academic Press 1970 (1970 a)
- CREER, K.M.: A review of palaeomagnetism.
Earth Sci. Rev., Amsterdam 6 (1970) 6, S. 369-466 (1970 b)
- CREER, K.M.: Mesozoic palaeomagnetic reversal column.
Nature, London 233 (1971) 5321, S. 545-546
- DJUKOV, A.I.: Versuch einer paläomagnetischen Orientierung von Bohrkernen aus Bohrungen des östlichen Donbaß (russ.).
Razvedka nedr, Moskva 4 (1946), S. 33-36
- DOELL, R.R.; COX, A.: The accuracy of the paleomagnetic method as evaluated from historic Hawai lava flows.
J. geophys. Res., Richmond 68 (1963) 7, S. 1997-2009
- FISHER, R.A.: Dispersion on a sphere.
Proc. roy. Soc. London A 217 (1953), S. 295-305
- FRÖLICH, F.; LÖFFLER, H.: Untersuchungen zur Sicherung der paläomagnetischen Erkundung, I: Sedimentproben.
Gerlands Beitr. Geophysik, Leipzig 76 (1967) 5, S. 371-379
- FRÖLICH, F.; STILLER, H.; VOLLSTÄDT, H.: Magnetische Gesteinsmerkmale und ihre Beeinflußbarkeit.
Geophysik u. Geol., Leipzig 7 (1965), S. 19-24
- FULLER, M.: Magnetic orientation of borehole cores.
Geophysics, Tulsa 34 (1969) 5, S. 772-774
- FÜCHTBAUER, H.; MÜLLER, G.: Sedimente und Sedimentgesteine, S. 65 ff.
Stuttgart: Schweizerbart 1970
- GLUŠKO, V.V.; DIKENŠTEJN, G.CH.; SCHMIDT, K.; GOLDBECKER, K.: Rajonizovanie severnoj časti teritoriji GDR po vosrastu skladčatogo osnovanija.
Sov. geol., Moskva (1974) 5, S. 37-43
- GRAHAM, J.W.: The stability and significance of magnetism in sedimentary rocks.
J. geophys. Res., Richmond 54 (1949) 2, S. 131-167
- HARGRAVES, R.B.; PERKINS, W.E.: Investigations of the effect of shock on natural remanent magnetism.
J. geophys. Res., Richmond 74 (1969) 10, S. 2576-2589
- HARRISON, C.G.A.: The paleomagnetic record from deep-sea cores.
Trans. amer. geophys. Un., Richmond 54 (1973) 7, S. 702-703
- HELLBARDT, G.: Das astatische Magnetometer und seine Verwendung zur Messung sehr schwacher Gesteinsmagnetisierungen.
Geol. Jb., Hannover 75 (1959), S. 319-346

- IRVING, E.: Palaeomagnetic pole positions, I: Pole numbers 1/1 to 1/144.
Geophys. J. roy. astron. Soc., London 3 (1960) 1, S. 96-111 (1960 a)
- IRVING, E.: Palaeomagnetic directions and pole positions, II: Pole numbers 2/1 to 2/41 and 1/71 (mI).
Geophys. J. roy. astron. Soc., London 3 (1960) 4, S. 444-449 (1960 b)
- IRVING, E.: Palaeomagnetic directions and pole positions, III: Pole numbers 3/1 to 3/87.
Geophys. J. roy. astron. Soc., London 5 (1961) 1, S. 70-79
- IRVING, E.: Palaeomagnetic directions and pole positions, IV: Pole numbers 4/1 to 4/34.
Geophys. J. roy. astron. Soc., London 6 (1962) 2, S. 263-267
- IRVING, E.: Palaeomagnetic directions and pole positions, V: Pole numbers 5/1 to 5/95.
Geophys. J. roy. astron. Soc., London 7 (1963) 2, S. 263-274
- IRVING, E.: Palaeomagnetism and its application to geological and geophysical problems.
New York: Wiley 1964, 399 S.
- IRVING, E.: Palaeomagnetic directions and pole positions, VII: Numbers 7/1 to 7/80.
Geophys. J. roy. astron. Soc., London 9 (1965) 2/3, S. 185-194
- IRVING, E.: Nomenclature in magnetic stratigraphy.
Geophys. J. roy. astron. Soc., Oxford 24 (1971) 5, S. 529-531
- IRVING, E.; STOTT, P.M.: Palaeomagnetic directions and pole positions, VI: Numbers 6/1 to 6/73.
Geophys. J. roy. astron. Soc., London 8 (1963) 2, S. 249-257
- JANOVSKY, B.M.: Probleme des Paläomagnetismus in der UdSSR.
Freib. Forsch. H., Berlin C 100 (1961), S. 56-85
- JELINEK, V.: A high sensitivity spinner magnetometer.
Stud. geophys. et geodaet., Praha 10 (1966) 1, S. 58-77
- KEAN, W.F.; FULLER, M.: On the effect of uniaxial compression on weak field susceptibility of rocks.
Trans. amer. geophys. Un., Richmond 52 (1971) 4, S. 191
- KINOSHITA, H.; MERRILL, R.: Paleomagnetic and rock magnetic results for some North Pacific sedimentary cores.
Trans. amer. geophys. Un., Richmond 53 (1972) 3, S. 266
- KIRILLOV, V.M.; APARIN, V.P.: O ispol'zovanii kerna osadočnykh porod v paleomagnitnykh issledovanijach. Sbornik tezisov dokladov VIII konferencii po voprosam postojannogo geomagnitnogo polja, magnetizma gornych porod i paleomagnetizma, Teil II, Moskva 1970, S. 191-196
- KNEEN, S.J.: The palaeomagnetism of the Foyers plutonic complex, Invernesshire.
Geophys. J. roy. astron. Soc., Oxford 32 (1973), S. 53-63
- KOMAROV, S.G.: Geofizičeskie promyslovoj geofiziki, S. 460-478.
Moskva: Gostoptechizdat 1957
- KONRAD, H.J.; NAIRN, A.E.M.: The palaeomagnetism of the Permian rocks of the Black Forest, Germany.
Geophys. J. roy. astron. Soc., Oxford 27 (1972) 4, S. 369-382
- KRS, M.: On the palaeomagnetic stability of red sediments.
Geophys. J. roy. astron. Soc., Oxford 12 (1967) 3, S. 313-317 (1967 a)
- KRS, M.: On the origin of dispersion of the Upper-Paleozoic virtual pole positions.
Geophys. Sb., Praha 15 (1967), S. 337-353 (1967 b)
- KRS, M.; TASLER, R.: Paläomagnetismus der Oberkarbongesteine im Innersudetischen Becken (Nordostböhmen).
Geophysik u. Geol., Leipzig 12 (1968), S. 37-45

- LANGE, P.: Über Bohrlochabweichungen im Mittelharz.
 Z. geol. Wiss., Berlin 1 (1973) 11, S. 1425-1432
- LARSON, E.E.; WATSON, D.E.; JENNINGS, W.: Regional comparison of a Miocene geomagnetic transition in Oregon and Nevada.
 Earth and planet. Sci. Lett., Amsterdam 11 (1971) 5, S. 391-400
- LEGAT, W.H.: Über die Anwendbarkeit der elektromagnetischen Bohrkernorientierung.
 Redex-Rdsch., Radentheim (1957) 2, S. 508-511
- LENK, A.: Bestimmung der Raumlage eines Schicht- oder Schieferungskomplexes aus einer Bohrung mit nichtorientierter Kernentnahme.
 Z. angew. Geol., Berlin 10 (1964) 6, S. 322-323
- LIN'KOVA, T.I.: Nekotorye rezul'taty paleomagnitnykh issledovaniy osadočnykh gornych porod devona.
 Izv. AN SSSR, Ser. geofiz., Moskva (1963) 2, S. 318-323
- LORBACH, M.: Kernbohrungen im Dienste der Lagerstättenerschließung.
 Berg- u. hüttenmänn. Mh., Wien 109 (1964) 8, S. 268-270
- LYNTON, E.D.: Laboratory orientation of well cores by their magnetic polarity.
 Bull. amer. Assoc. Petrol. Geol., Tulsa 21 (1937), S. 580-589
- MACKERETH, F.J.H.: On the variation in direction of the horizontal component of remanent magnetization in lake sediments.
 Earth and planet. Sci. Lett., Amsterdam 12 (1971) 3, S. 332-338
- McELHINNY, M.W.: Palaeomagnetic directions and pole positions, VIII: Pole numbers 8/1 to 8/186.
 Geophys. J. roy. astron. Soc., Oxford 15 (1968), S. 409-430 (1968 a)
- McELHINNY, M.W.: Palaeomagnetic directions and pole positions, IX: Pole numbers 9/1 to 9/159.
 Geophys. J. roy. astron. Soc., Oxford 16 (1968), S. 207-224 (1968 b)
- McELHINNY, M.W.: Palaeomagnetic directions and pole positions, X: Pole numbers 10/1 to 10/200.
 Geophys. J. roy. astron. Soc., Oxford 18 (1969), S. 305-327
- McELHINNY, M.W.: Palaeomagnetic directions and pole positions, XI: Pole numbers 11/1 to 11/90.
 Geophys. J. roy. astron. Soc., Oxford 20 (1970), S. 417-429
- McELHINNY, M.W.: Palaeomagnetic directions and pole positions, XII: Pole numbers 12/1 to 12/180.
 Geophys. J. roy. astron. Soc., Oxford 27 (1972), S. 237-257 (1972 a)
- McELHINNY, M.W.: Palaeomagnetic directions and pole positions, XIII: Pole numbers 13/1 to 13/94.
 Geophys. J. roy. astron. Soc., Oxford 30 (1972), S. 281-293 (1972 b)
- McELHINNY, M.W.; BRIDEN, J.C.: Continental drift during the Palaeozoic.
 Earth and planet. Sci. Lett., Amsterdam 10 (1971), S. 407-416
- McMURRY, E.W.: Palaeomagnetic results from Scottish lavas of Lower Devonian age.
 In: Palaeogeophysics, ed. by S.K. RUNCORN, S. 253-262.
 London: Academic Press 1970
- MENNING, M.: Die nachträgliche Orientierung von Bohrkernen unter besonderer Berücksichtigung des Paläomagnetismus.
 Unveröff. Diss., Greifswald 1974, 128 S.
- MÖBUS, G.: Strukturtektonik.
 WTI Sonderheft 6, Berlin (1970), 60 S.
- MORRIS, W.A.; BRIDEN, J.C.; PIPER, J.D.A.; SALLOMY, J.T.: Palaeomagnetic studies in the British Caledonides, V: Miscellaneous data.
 Geophys. J. roy. astron. Soc., Oxford 34 (1973) 1, S. 69-105

- MULDER, F.G.: Paleomagnetic research in some parts of central and southern Sweden. Sver. geol. Unders., Stockholm C 653 (1971), 56 S.
- MUNDT, W.: Der Charakter der geomagnetischen Säkularvariation in Europa im Zeitraum von 1950 bis 1970. Veröff. Zentralinst. Physik d. Erde, Potsdam 23 (1973), 37 S.
- NAGATA, T.: Anisotropic magnetic susceptibility of rocks under mechanical stresses. Pure and appl. Geophys., Basel 78 (1970), S. 110-122
- NAGATA, T.; KONO, M.: The intensity of the geomagnetic field in geological time. In: Palaeogeophysics, ed. by S.K. RUNCORN, S. 65-72. London: Academic Press 1970
- NOZHAROV, P.B.: On the theory of depositional remanent magnetization in sediments. Pure and appl. Geophys., Basel 64 (1966), S. 52-58
- NOZHAROV, P.B.: Comments on the influence of fluid motion upon the magnetic orientation of sediments. Pure and appl. Geophys., Basel 70 (1968), S. 81-87
- OPDYKE, N.D.; HENRY, K.W.: A test of the dipole hypothesis. Earth and planet. Sci. Lett., Amsterdam 6 (1969), S. 139-151
- OPDYKE, N.D.; KENT, D.V.; LOWRIE, W.: Details of magnetic polarity transitions recorded in a high deposition rate deep-sea core. Earth and planet. Sci. Lett., Amsterdam 20 (1973), S. 315-324
- PETROVA, G.N.; ŽILJAEVA, V.A.: Laboratornyj kriterij magnitnoj stabil'nosti gornych porod. Izv. AN SSSR, Ser. geofiz., Moskva (1960) 9, S. 1328-1335
- PETERSON, D.N.; NAIRN, A.E.M.: Paleomagnetic results from Permian red beds from the southern United States. Trans. amer. geophys. Un., Richmond 52 (1971) 4, S. 189
- PIPER, J.D.A.; BRIDEN, J.C.: Palaeomagnetic studies in the British Caledonides, I: Igneous rocks of the Builth Wells - Llandridnod Wells Ordovician inlier, Radnorshire, Wales. Geophys. J. roy. astron. Soc., Oxford 34 (1973) 1, S. 1-12
- PORATH, H.: Anisotropie der magnetischen Suszeptibilität und Sättigungsmagnetisierung als Hilfsmittel der Gefügekunde. Geol. Rdsch., Stuttgart 60 (1971) 3, S. 1088-1103
- POTTER, P.E.; PETTIJOHN, F.J.: Paleocurrents and basin analysis. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1963, 296 S.
- PRIKEL, G.: Tiefbohrtechnik. Wien: Springer 1959, 414 S.
- PRUSAC, F.; SINDIJA, I.: Die Ursachen und die Folgen der Bohrlochkrümmung in den Dinariden (kroat.). Nafta Broj, Zagreb 6 (1967), S. 217-226
- RAINBOW, R.R.; FULLER, M.; SCHMIDT, V.A.: Paleomagnetic orientation of borehole samples. Trans. amer. geophys. Un., Richmond 53 (1972) 4, S. 355
- REICH, H.: Über die Grundlage der magnetischen Bohrkernorientierung. Öl u. Kohle, Berlin 37 (1941), S. 213-217
- ROTHER, K.: Gesteins- und paläomagnetische Untersuchungen an Gesteinsproben vom Territorium der DDR aus dem Präkambrium bis zum Tertiär und Folgerungen für die Veränderungen des geomagnetischen Hauptfeldes sowie für geologisch-geotektonische Interpretationsmöglichkeiten. Veröff. Zentralinst. Physik d. Erde, Potsdam 5 (1971), 99 S.
- ROY, J.L.; PARK, J.K.: Red beds: DRM or CRM? Earth and planet. Sci. Lett., Amsterdam 17 (1972) 1, S. 211-216

- RUNCORN, S.K.: International dictionary of geophysics, S. 1280.
Oxford: Pergamon Press 1967
- RŽEVSKIJ, Ju. S.; GAAS, G. Ja.: Rezul'taty paleomagnitnogo issledovanija kerna jurskich osadkov Mangyšlaka.
Fizika Zemli, Moskva (1973) 2, S. 100-103
- SALLOMY, J.T.; PIPER, J.D.A.: Palaeomagnetic studies in the British Caledonides, II: The Younger Gabbros of Aberdeenshire, Scotland.
Geophys. J. roy. astron. Soc., Oxford 34 (1973) 1, S. 13-25 (1973 a)
- SALLOMY, J.T.; PIPER, J.D.A.: Palaeomagnetic studies in the British Caledonides, IV: Lower Devonian lavas of the Strathmore region, Scotland.
Geophys. J. roy. astron. Soc., Oxford 34 (1973) 1, S. 47-68 (1973 b)
- SCHENK, E.: Zur Problematik der Deutung paläomagnetischer Meßergebnisse auf Grund von Untersuchungen an den Basalten des Paläovulkans Vogelsberg in Hessen.
Z. Geophysik, Würzburg 36 (1970), S. 359-385
- SCHLUMBERGER: Introduction to Schlumberger Well Logging, Schlumberger Dokument Nr. 8.
In: Schlumberger Well Surveying Corporation, Chapter 11, S. 141-158.
Tulsa 1958
- SCHMIDT, K.; FRANKE, D.: Stand und Probleme der Karbonforschung in der Deutschen Demokratischen Republik. Teil I: Unterkarbon.
Z. geol. Wiss., Berlin 3 (1975) 7, S. 819-949
- SCHMUCKER, U.: Gesteinsmagnetische Untersuchungen und Experimente am Basalt des Steinberges bei Barlissen.
Abh. Akad. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl., 3. Folge,
Göttingen 26 (1957), 102 S.
- SNAPE, C.: An example of anhysteretic moments being induced by alternating field demagnetization apparatus.
Geophys. J. roy. astron. Soc., Amsterdam 23 (1971), S. 361-364
- SOFFEL, H.: Über die Möglichkeiten von paläomagnetischen Messungen an Gesteinen des Präkambriums.
Geol. Rdsch., Stuttgart 61 (1972) 1, S. 16-33
- SOFFEL, H.; SUPALAK, P.: Paläomagnetische Messungen am Basalt des Parkstein bei Weiden (Bayern).
Z. Geophysik, Würzburg 34 (1968), S. 287-296
- STACEY, F.D.: Effect of stress on the remanent magnetism of magnetite-bearing rocks.
J. geophys. Res., Richmond 63 (1958) 2, S. 361-368
- STEINHAUSER, P.; VINCENZ, S.A.: Equatorial paleopoles and behavior of the dipole field during polarity transitions.
Earth and planet. Sci. Lett., Amsterdam 19 (1973) 2, S. 113-119
- STORETVEDT, K.M.: The Devonian palaeomagnetic field for Europe. In: Palaeogeophysics, ed. by S.K. RUNCORN, S. 247-252.
London: Academic Press 1970
- STORETVEDT, K.M.: Some palaeomagnetic problems of strongly oxidized rocks.
Z. Geophysik, Würzburg 37 (1971), S. 487-492
- STORETVEDT, K.M.: Old Red sandstones palaeomagnetism of Central Spitsbergen and the Upper Devonian (Svalbordian) phase of deformation.
Arbok, Oslo 1970 (1972), S. 59-69
- STORETVEDT, K.M.; HALVORSEN, E.; GJELLESTAD, G.: Thermal analysis of the NRM of some Upper Silurian red sandstones in the Oslo region.
Tectonophysics, Amsterdam 2 (1968) 5, S. 413-426
- STORETVEDT, K.M.; PETERSEN, N.: On chemical magnetization in some Permian lava flows of southern Norway.
Z. Geophysik, Würzburg 36 (1970), S. 569-588
- STORETVEDT, K.M.; PETERSEN, N.: Palaeomagnetic properties in the Middle - Upper Devonian volcanics of the Orkney Islands.
Earth and planet. Sci. Lett., Amsterdam 14 (1972), S. 269-278

- SWIFT, G.: Dip-log computer chart.
J. Petrol.-Techn., Well Surveys Inc., Tulsa (1959), S. 23-28
- TARLING, D.H.; MITCHELL, J.G.; SPALL, H.: A paleomagnetic and isotopic age for the Wackerfield dyke of northern England.
Earth and planet. Sci. Lett., Amsterdam 18 (1973), S. 427-432
- TARLING, D.H.; SYMONS, D.T.A.: A stability index of remanence in palaeomagnetism.
Geophys. J. roy. astron. Soc., Oxford 12 (1967) 4, S. 443-448
- THORNING, L.: Palaeomagnetic results from Lower Devonian rocks of the Cheviot Hills, Northern England.
Geophys. J. roy. astron. Soc., Oxford 36 (1974) 2, S. 487-496
- TRETJAK, A.N.: Paleomagnetizm srednego i verchnego paleozoja USSR.
Kiev: Nauka Dumka 1965, 132 S.
- TREY, F.; FANINGER, G.: Magnetische Bohrkernorientierung.
Radex-Rdsch., Radentheim (1961) 5, S. 699-703
- TROPIN, Ju. D.; KOVALENKO, G.V.: Učet ošibki naklonenija pri paleomagnitnyh issledovanijach.
Fizika Zemli, Moskva (1966) 9, S. 62-71
- VADKOVSKIJ, V.N.: Ob izučenii raspredelenija naprjaženij v skladkach gornych porod po izmeneniju ostatočnoj namagničennosti pod davleniem. In: Nastojasšee i prošloe magnitnogo polja zemli, S. 130-133.
Moskva: Nauka 1965
- VLASOV, A.Ja.; KOVALENKO, G.V.: Magnetizm perechodnyh sloev meždu zonami s prjamoj i obratnoj namagničennost'ju.
Izv. AN SSSR, Ser. geofiz., Moskva (1963) 4, S. 552-560
- VLASOV, A.Ja.; KOVALENKO, G.V.: Magnitnaja anizotropija iskusstvennyh osadkov i osadočnyh porod. In: Nastojasšee i prošloe magnitnogo polja zemli, S. 133-143.
Moskva: Nauka 1965
- VLASSENKO, M.J.: Das stratametrische Studium der Bohrlöcher.
Z. angew. Geol., Berlin 2 (1956) 10, S. 468-469
- WEIDERMANN, H.: Der Einsatz von Stabilisatoren und Stabilisatorensystemen zur Vermeidung von Bohrlochabweichungen und zur Verkürzung der Bohrzeiten.
Informationsbrief VEB EE Grimmen, Grimmen (1970) 1, 63 S.
- WILEY, Ch.: New "packed hole" tool combats hole deviation.
Drilling, Dallas (1965) 6, S. 62-75
- WURSTER, P.: Geometrie und Geologie von Kreuzschichtungskörpern.
Geol. Rdsch., Stuttgart 47 (1958) 1, S. 322-359
- ŽILJAEVA, V.A.: K voprosu o magnitnoj vjazkosti gornych porod. In: Nastojasšee i prošloe magnitnogo polja zemli, S. 172-176.
Moskva: Nauka 1965

Weiterhin wurden unveröffentlichte wissenschaftliche Berichte folgender Autoren verwendet:

FRICKE, S., 1970; KAGELS, B., 1970; MEISSNER, B., 1972; MENNING, M., 1971

Verzeichnis der Tabellen und Anlagen

| | Seite | |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tab. 1 | Gliederung der Orientierungsverfahren in Beziehung zum Ort der Orientierung | 9 |
| Tab. 2 | Gliederung der Orientierungsverfahren in Beziehung zum Bohrkern | 9 |
| Tab. 3 | Paläopolpositionen für Europa und das Paläokoordinatensystem im Untersuchungsgebiet | 20 |
| Tab. 4 | Die Beziehung zwischen Deklination, Inklination, Polarität und Paläobreite | 35 |
| Tab. 5 | Die Polarität der Proben und die paläogeographische Breite der Norddeutsch-Polnischen Senke, abgeleitet aus der Remanenz der Bohrkern | 35 |
| Tab. 6 | Maximale Richtungsabweichung $\Delta\lambda$ zwischen der Schicht-einfalllineare am Kern (sEL) und der im Anstehenden (EL) | 47 |
| Tab. 7 | Beeinflussung der Orientierungsverfahren | 81 |
| Tab. 8 | Aussagekraft der Orientierungsverfahren in den untersuchten Bohrungen | 83 |
| Tab. 9 | Ökonomischer Aufwand der Orientierungsverfahren | 84 |
| Anlage 1 | Probenverzeichnis (Gesteinsmerkmale und Charakteristik der Remanenz) | |
| Anlage 2 | Polpositionen für Eurasien vom Ordovizium bis zum Perm | |

Anl. 1 Probenverzeichnis (Gesteinsmerkmale und Charakteristik der Remanenz)

| Bhg. | Gesteinsmerkmale | | | | | | | BA | | | NRM | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|------------------|------------|--------|--------|------------------------------|---------------|----------|-------------|-------|--------|----------|-----------------------------------|----|-----|----|------|----|-----------------|-------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------|----|-------|----------|------------|----|
| | Probennummer | Lithologie | Farbe | Gefüge | Ausbildung der Schichtfläche | Einfallen [°] | n Klüfte | n Harnische | λ [°] | Δλ [°] | n Würfel | Intensität der NRM bei 0 Oe [n T] | Dm | ΔDm | Im | ΔIm | k | α ₉₅ | Homogenität | Entmagnetisierungs-Stufe [Oe] | Dm nach Kopf-Krone -Orientierung | nach Neigungs-korrektur | | CRM | beste Dm | Wertigkeit | Dm |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Dm | Im | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | | |
| 1 | Si,fs | s-gr | par | +eben | 20 | 0 | 0 | 222 | 31 | 6 | 0,6 | 322 | 4 | -74 | 4 | 59 | 9 | + | 100 | 218 | - | - | - | (218) | + | | |
| 2 | FS,ms | gr | par | -eben | 19 | 1 | 0 | 222 | 33 | 6 | 0,6 | 278 | 12 | +54 | 13 | 2 | 69 | - | 100 | + | - | - | - | - | - | | |
| 3 | FS,MS | gr | par | eben | 20 | 1 | 0 | 225 | 36 | 6 | 1,3 | 131 | 4 | +24 | 7 | 9 | 24 | - | 100 | + | - | - | - | - | - | | |
| 4 | MS,fs | gr | par | +eben | 21 | 1 | 0 | 225 | 34 | 6 | 2,2 | 74 | 14 | +9 | 20 | 5 | 34 | - | 400 | 106 | - | - | - | - | - | | |
| 5 | MS | d-gr | par | +eben | 11 | 4 | 0 | 225 | 90 | 6 | 6,1 | 45 | 30 | -4 | 27 | 2 | 78 | - | 200 | 135 | - | - | - | - | - | | |
| 6 | FS,m | gr | par | +eben | 15 | 2 | 0 | 227 | 56 | 6 | 0,3 | 82 | 18 | +63 | 4 | 13 | 20 | - | 100 | + | - | - | - | - | - | | |
| 7 | Si,t | s-gr | par | +eben | 20 | 0 | 0 | 225 | 49 | 5 | 0,6 | 112 | 30 | +37 | 25 | 31 | 14 | + | 400 | + | - | - | - | 112 | + | | |
| 8 | Si | s-gr | par? | eben | 9 | 0 | 1 | 225 | 90 | 5 | 0,7 | | | | | | | - | | | | | | | | | |
| 9 | Si | s-gr | par | -eben | 8 | 4 | 1 | 230 | 90 | 6 | 0,7 | 41 | 23 | -8 | 61 | 9 | 23 | - | 800 | 139 | - | - | - | (139) | + | | |
| 10 | Si,fs | d-gr | schr | eben | 15 | 0 | 0 | 214 | 90 | 6 | 0,6 | 165 | 20 | +43 | 45 | 210 | 5 | + | 200 | + | - | - | - | 165 | + | | |
| 11 | Si,t | s-gr | par? | -eben | 12 | 0 | 0 | 207 | 90 | 8 | 1,1 | 138 | 12 | +24 | 4 | 20 | 13 | + | 100 | + | - | - | - | (138) | + | | |
| 12 | MS | h-gr | +schr | -eben | 15 | 1 | 0 | 207 | 54 | 6 | 0,5 | 359 | 4 | +58 | 3 | 3 | 50 | - | 100 | 181 | - | - | - | - | - | | |
| 13 | T,si | s-gr | flas | -eben | 11 | 0 | 0 | 207 | 90 | 5 | 253,0 | 126 | 2 | +4 | 14 | 550 | 3 | + | 400 | + | - | - | - | 126 | + | | |
| 14 | T,si | s-gr | par | eben | 13 | 0 | 1 | 207 | 70 | 6 | 0,7 | 124 | 5 | +32 | 39 | 31 | 12 | + | 400 | + | - | - | - | 124 | + | | |
| 15 | T,si | s-gr | par/fl | eben | 11 | 0 | 1 | 216 | 90 | 6 | 0,6 | 140 | 10 | +29 | 38 | 33 | 12 | + | 400 | + | - | - | - | 140 | + | | |
| 17 | T | s-gr | par | eben | 10 | 1 | 1 | 207 | 90 | 9 | 177,0 | 293 | 4 | +9 | 17 | 80 | 6 | + | 200 | + | - | - | - | 293 | + | | |
| Bohrung II | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | MS | gr-br | par | -wel | 8 | 0 | 0 | 5 | 5 | 6 | 5,1 | 232 | 6 | +55 | 2 | 1300 | 2 | + | 800 | ? | 227 | +48 | + | 227 | + | | |
| 19 | Si,fs | h+s-gr | " | eben | 5 | 0 | 0 | 324 | 6 | 6 | 0,2 | | | | | | | - | | | | | | | | | |
| 20 | Si,fs | br-gr | par? | uneb | 7 | 0 | 0 | - | - | 6 | 0,4 | | | | | | | - | | | | | | | | | |
| 21 | GS,kg1 | h-gr | par? | -eben | 18 | 0 | 0 | 126 | 3 | 6 | 0,6 | 90 | 4 | +6 | 28 | 16 | 17 | - | 200 | + | - | - | - | (90) | + | | |
| 22 | M | d-gr | lins | uneb | 13 | 0 | 0 | 113 | 3 | 6 | 8,8 | 220 | 16 | +16 | 50 | 400 | 3 | + | 400 | + | - | - | ? | 220 | + | | |
| 23 | FS | h-gr | schr | eben | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0,3 | 158 | 18 | +56 | 9 | 2 | 76 | - | 100 | + | - | - | - | - | - | | |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |
|--------------------|---------|---------|--------|--------|----|---|---|-----|----|----|------|-----|----|-----|----|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|----|-------|----|
| 24 | TM,si | gr | -par | -eben | 11 | 1 | 0 | 146 | 2 | 6 | 4,7 | 210 | 20 | +62 | 21 | 230 | 4 | + | 200 | + | - | - | - | (210) | ± |
| 25 | FS,si | d-r-br | +schr | -eben | 28 | 4 | 0 | 172 | 4 | 5 | 3,2 | 158 | 4 | +64 | 9 | 5 | 37 | - | 400 | + | - | - | - | - | - |
| 26 | Si | br-gr | par? | -eben | 10 | 0 | 1 | 173 | 10 | 6 | 3,8 | 157 | 11 | +9 | 51 | 39 | 11 | ± | 800 | + | 158 | 0 | - | 157 | + |
| 27 | FS | br-gr | -schr | eben | 16 | 0 | 1 | 172 | 7 | 6 | 5,2 | | | | | | | - | | | | | | | |
| 28 | FS,Si | br-gr | par | +eben | 12 | 0 | 0 | 159 | 9 | 6 | 3,1 | 183 | 5 | +52 | 14 | 21 | 15 | ± | 100 | + | 183 | +38 | - | (183) | ± |
| 29 | MS,fs | h+d-gr | par | eben | 19 | 3 | 0 | 162 | 7 | 6 | 4,4 | 74 | 55 | +73 | 12 | 10 | 23 | - | 200 | + | - | - | - | - | - |
| Bohrung III | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | T *S | r-br,gn | -par | -wel | 24 | 0 | 0 | 230 | 9 | 5 | 35,0 | 191 | 0 | +24 | 5 | 270 | 5 | + | 800 | + | 190 | ± 0 | + | 190 | + |
| 31 | T>Si>FS | r-br,gn | -par | -eben | 20 | 0 | 1 | 230 | 11 | 6 | 41,5 | 159 | 3 | +33 | 8 | 78 | 7 | + | 800 | + | 162 | +14 | + | 162 | + |
| 32 | FS,si | (br)-r | par | eben | 35 | 1 | 0 | 223 | 7 | 5 | 22,5 | 196 | 14 | +77 | 6 | 320 | 4 | + | 800 | + | 185 | +44 | + | 185 | + |
| 33 | T *Si | (br)-r | grad | eben | 64 | 0 | 0 | 223 | 7 | 6 | 16,7 | 241 | 6 | +28 | 4 | 510 | 3 | + | 800 | + | 238 | +11 | + | 238 | + |
| 34 | T,si,fs | h-gr/gn | -par | -eben | 63 | 0 | 0 | 223 | 4 | 6 | 30,0 | 355 | 7 | +30 | 6 | 110 | 6 | + | 800 | ? | - | - | | 355 | ± |
| 36 | T,si | s-gr | par | eben | 67 | 0 | 0 | 222 | 4 | 6 | 1,0 | 359 | 26 | +27 | 38 | 95 | 7 | + | 200 | + | 188 | +87 | - | 359 | ± |
| 37 | T,si | s-gr | par? | eben | 72 | 0 | 0 | 221 | 4 | 6 | 0,7 | 352 | 4 | +19 | 5 | 260 | 4 | + | 200 | + | 268 | +83 | - | 352 | + |
| 38 | FS,si | d-gr | par? | eben | 71 | 5 | 0 | 220 | 4 | 6 | 0,7 | 25 | 7 | +22 | 4 | 16 | 18 | - | 100 | 155 | 72 | -63 | - | (155) | - |
| 39 | MS | d-gr | par? | eben | 85 | 3 | 0 | 220 | 3 | 6 | 0,4 | 354 | 27 | +52 | 54 | 2 | 67 | - | 100 | - | - | - | - | - | - |
| 40 | Si | s | par | eben | 73 | 0 | 1 | 220 | 4 | 5 | 0,8 | 343 | 4 | +23 | 5 | 85 | 7 | + | 200 | ? | 248 | 72 | - | 343 | + |
| Bohrung IV | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 41 | T,si | gr | par | eben | 8 | 1 | 0 | 69 | 5 | 6 | 0,6 | 310 | 6 | +80 | 2 | 170 | 5 | + | 200 | ? | 249 | +82 | - | (310) | ± |
| 42 | T,si | gr | +par | +eben | 13 | 4 | 0 | 69 | 3 | 6 | 0,3 | 333 | 7 | +72 | 4 | 160 | 5 | + | 100 | + | 291 | +81 | - | 333 | + |
| 43 | Si,fs | gr | par | +eben | 22 | 0 | 1 | 243 | 1 | 6 | 0,7 | 325 | 4 | +58 | 7 | 190 | 5 | + | 100 | + | - | - | - | 325 | + |
| 44 | Si,fs | d-gr | +par | +eben | 42 | 0 | 0 | 235 | 1 | 6 | 1,8 | 360 | 12 | +52 | 8 | 200 | 5 | + | 400 | ? | 84 | +86 | - | (360) | ± |
| 45 | T,si | r-br | par | -eben | 20 | 0 | 3 | 239 | 6 | 6 | 11,1 | 194 | 1 | +5 | 6 | 140 | 6 | + | 800 | 346 | 345 | +5 | + | 346 | + |
| 46 | Si,T | r-br | -par | -eben | 29 | 0 | 2 | 239 | 4 | 6 | 7,5 | 351 | 1 | +11 | 18 | 13 | 19 | ± | 800 | + | 348 | +36 | + | 351 | ± |
| Bohrung V | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 50 | KM | gr | par | eben | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0,2 | | | | | | | ? | | | | | | | |
| 51 | KM | s-gr | -par | eb/wel | 6 | 0 | 0 | 180 | 46 | 6 | 3,7 | 145 | 12 | +25 | 51 | 270 | 4 | + | 200 | + | - | - | - | 145 | + |
| 52 | M, TM | s-gr | par? | eben | 6 | 0 | 0 | 212 | 90 | 6 | 2,0 | 235 | 13 | +37 | 41 | 110 | 6 | + | 400 | + | - | - | - | 235 | + |
| 53 | M | s-gr | par? | -eben | 13 | 0 | 0 | 212 | 34 | 6 | 1,7 | 161 | 46 | +75 | 12 | 130 | 6 | + | 400 | + | - | - | - | 161 | + |
| 54 | M,si | s-gr | par | eb/wel | 5 | 0 | 0 | 220 | 90 | 6 | 1,9 | 193 | 15 | +58 | 23 | 150 | 6 | + | 400 | + | - | - | - | 193 | + |
| 55 | M,t>si | s-gr | par | eben | 8 | 0 | 0 | 220 | 53 | 6 | 2,2 | 202 | 11 | +59 | 15 | 27 | 13 | ± | 400 | + | - | - | - | 202 | + |
| 56 | T,si | d-gr | par,fl | -eben | 10 | 0 | 2 | 221 | 41 | 6 | 1,0 | | | | | | | - | | | | | | | |
| 57 | M,si | s-gr | par | -eben | 14 | 0 | 0 | 214 | 37 | 6 | 0,5 | | | | | | | - | | | | | | | |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |
|---------------------|---------|--------|---------|---------|----|---|---|-----|----|----|-------|-----------------------|----|-----|----|------|----|----|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|
| Bohrung VI | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 65 | Si,t,fs | r-br | -flas | -uneb | 6 | 0 | 0 | 333 | 70 | 6 | 19,5 | 14 | 4 | +69 | 6 | 92 | 7 | + | 800 | + | 20 | +75 | + | 14 | + |
| 66 | Si | r-br | mas | uneb | 10 | 0 | 0 | 333 | 34 | 6 | 15,0 | 126 | 4 | -73 | 7 | 43 | 10 | + | 400 | + | 93 | -76 | + | 126 | + |
| 67 | Si | r-br | fl,schr | -uneb | 8 | 0 | 0 | 333 | 45 | 6 | 21,8 | 79 | 11 | +69 | 7 | 94 | 7 | + | 800 | + | 100 | +69 | + | 79 | + |
| 68 | Si | r-br | par | -eb/wel | 10 | 1 | 0 | 65 | 6 | 6 | 10,8 | 169 | 10 | +70 | 8 | 62 | 9 | + | 800 | + | 173 | +60 | + | 169 | + |
| 69 | FS,si | r-br | flas | -eb/wel | 8 | 0 | 0 | 65 | 6 | 6 | 10,6 | 154 | 28 | +77 | 5 | 100 | 7 | + | 800 | + | 156 | +72 | + | 154 | + |
| 69a | FS,Si | r-br | par | fl/uneb | 5 | 0 | 0 | 65 | 12 | 6 | 8,4 | | | | | | | | | | | | | | |
| Bohrung VII | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 70 | K,m | h-gr | mas | uneb | 15 | 0 | 0 | 163 | 10 | 6 | 0,2 | nur bei 0 Oe gemessen | | | | | | | | | | | | | |
| 71 | KM | gr | mas | eben | 11 | 0 | 1 | 160 | 14 | 6 | 3,2 | 215 | 4 | +67 | 5 | 98 | 7 | + | 200 | + | 206 | +57 | - | 215 | + |
| 72 | M | s-gr | mas/par | eben | 9 | 0 | 0 | 173 | 34 | 5 | 2,6 | 188 | 30 | +57 | 25 | 380 | 3 | + | 200 | + | 187 | +48 | - | 188 | + |
| 73 | M | s-gr | mas/par | eben | 9 | 0 | 0 | 173 | 34 | 6 | 2,8 | 200 | 15 | +50 | 32 | 123 | 6 | + | 200 | + | 196 | +41 | - | 200 | + |
| 75 | M | s-gr | mas/par | eben | 10 | 0 | 1 | 184 | 14 | 5 | 1,0 | 190 | 18 | +53 | 16 | 35 | 13 | ± | 200 | + | - | - | - | 190 | + |
| 76 | M | s-gr | par | eb/wel | 10 | 0 | 0 | 184 | 15 | 6 | 1,0 | 186 | 13 | +59 | 18 | 99 | 7 | + | 200 | + | 185 | +49 | - | 186 | + |
| Bohrung VIII | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 81 | Si,t | r-br | +par | +eben | 40 | 0 | 0 | 223 | 6 | 6 | 63,5 | 227 | 2 | -1 | 4 | 1300 | 2 | + | 800 | + | 235 | -26 | + | 235 | + |
| 82 | Si,t | r-br | +par | +eben | 45 | 0 | 0 | 223 | 6 | 6 | 42,5 | 316 | 1 | +1 | 1 | 9999 | 1 | + | 800 | 224 | 234 | -31 | + | 234 | + |
| 83 | FS>Si>T | (r)-br | par | +eben | 40 | 1 | 1 | 146 | 11 | 6 | 125,0 | 232 | 10 | -3 | 17 | 770 | 2 | + | 800 | + | 241 | -26 | + | 241 | + |
| 85 | MS | r | mas | eben | 70 | 1 | 0 | 144 | 10 | 5 | 26,2 | 8 | 1 | +18 | 6 | 130 | 7 | + | 800 | + | 77 | +82 | + | 77 | ± |
| 86 | FS>Si | s-gr | par | eb/wel | 37 | 1 | 2 | 153 | 20 | 5 | 0,2 | 354 | 35 | +42 | 9 | 7 | 31 | - | 200 | + | - | - | - | - | - |
| Bohrung IX | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 94 | Si | (r)-br | -par | eben | 15 | 0 | 0 | 216 | 25 | 6 | 3,3 | 20 | 7 | +66 | 17 | 8 | 26 | - | 400 | + | 44 | +78 | + | - | - |
| 96 | KM | gr | fl,mas | uneb | 13 | 0 | 0 | 60 | 12 | 5 | 0,3 | 75 | 14 | -2 | 58 | 140 | 6 | + | 200 | + | 75 | +1 | - | 75 | + |
| 97 | KM | gr | fl,mas | -uneb | 24 | 4 | 1 | 63 | 6 | 6 | 0,2 | 19 | 6 | -32 | 62 | 330 | 4 | + | 200 | + | - | - | - | 19 | + |
| 98 | KM | gr | fl,mas | -uneb | 16 | 1 | 1 | 63 | 10 | 6 | 0,2 | 31 | 3 | -9 | 62 | 90 | 7 | + | 200 | + | - | - | - | 31 | + |
| 99 | K,si | vio-gr | fl,mas | uneb | 18 | 1 | 0 | 63 | 8 | 6 | 3,6 | 340 | 1 | +25 | 1 | 5900 | 1 | + | 800 | + | 336 | +42 | + | 340 | + |
| Bohrung X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 100 | K,t | h-gr | mas>fl | -uneb | 5 | 0 | 0 | 190 | 9 | 6 | 0,2 | 217 | 12 | +12 | 19 | 90 | 7 | + | 200 | ? | - | - | - | 217 | ± |
| 101 | K,t | gr | flas | -uneb | 10 | 0 | 1 | 190 | 4 | 2 | 0,3 | 321 | 7 | +22 | 31 | 430 | 12 | + | 200 | + | - | - | - | 321 | + |
| 102 | K,t | h-gr | mas,fl | -uneb | 14 | 0 | 0 | 190 | 3 | 6 | 0,1 | 221 | 6 | +9 | 12 | 160 | 5 | + | 100 | ? | - | - | - | 221 | ± |
| Bohrung XI | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 110 | MS | r | +schr | eben | 14 | 0 | 0 | 246 | 4 | 6 | 14,4 | 128 | 1 | -10 | 4 | 1000 | 2 | + | 800 | + | 126 | -19 | + | 128 | + |
| 114 | Si,t | d-br | par | -uneb | 16 | 2 | 0 | 230 | 4 | 6 | 36,2 | 171 | 0 | -11 | 4 | 2900 | 1 | + | 800 | + | 170 | -26 | + | 171 | + |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |
|-----|---------|------|--------|-------|----|---|---|-----|----|----|------|-----|----|-----|----|------|----|----|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|
| 115 | Si | d-br | par | eben | 20 | 0 | 0 | 230 | 3 | 6 | 31,4 | 156 | 1 | - 7 | 3 | 3100 | 1 | + | 800 | + | 170 | -26 | + | 156 | + |
| 116 | T,si | s-gr | par | -eben | 14 | 0 | 1 | 234 | 18 | 6 | 1,2 | 146 | 7 | +16 | 31 | 310 | 4 | + | 200 | + | 147 | + 5 | - | 146 | + |
| 119 | Si,fs | d-gr | par | -eben | 19 | 0 | 0 | 227 | 20 | 6 | 1,0 | 144 | 3 | + 3 | 43 | 85 | 7 | + | 400 | + | - | - | - | 144 | + |
| 120 | Si,t,fs | s-gr | par | eben | 11 | 0 | 0 | 224 | 45 | 6 | 12,2 | 153 | 23 | - 8 | 63 | 120 | 6 | + | 800 | + | 152 | -15 | - | 153 | + |
| 121 | Si,t,fs | s-gr | par | eben | 10 | 0 | 0 | 224 | 51 | 6 | 6,7 | 44 | 1 | + 3 | 67 | 250 | 4 | + | 400 | 136 | - | - | - | 136 | + |
| 123 | Si,fs,t | s-gr | par,fl | eben | 9 | 0 | 0 | 238 | 72 | 6 | 2,0 | 167 | 25 | +20 | 54 | 90 | 7 | + | 800 | + | 167 | +11 | - | 167 | + |

Legende

- 2 Lithologie: T = Tonstein, Si = Siltstein, FS = Feinsandstein, MS = Mittelsandstein, GS = Grobsandstein, M = Mergelstein, TM = Tonmergelstein, KM = Kalkmergelstein, K = Kalkstein, t = tonig, si = siltig, fs = feinsandig, m = mergelig, kgl = konglomeratisch
- 3 Farbe: d = dunkel, h = hell, br = braun, gr = grau, gn = grün, r = rot, s = schwarz, vio = violett
- 4 Gefüge: par = Parallelschichtung (+ = sehr gut ausgeprägt, - = nicht exakt ausgeprägt), schr = Schrägschichtung (- = leichte, + = ausgeprägte), flas (fl) = flasrige, mas = massige, lins = linsige, grad = gradierte Schichtung
- 5 Schichtfläche: +eben = vollständig eben, -eben = nicht exakt eben, +uneb = stark uneben, -uneb = leicht uneben, (-)wel = (leicht) wellig
- 6 Einfallen am Kern [°]
- 7 und 8 : Anzahl der Klüfte und Harnische im Kernstück
- 9 Azimut der Bohrlochabweichung
- 10 maximaler Winkel ($\Delta\lambda$) zwischen wahrer (EL) und scheinbarer Schichteinfalllineare (sEL) am Kern
- 13 Homogenität der Remanenz: + = homogene, ± = nahezu homogene, - = inhomogene
- 13 bis 19 : Werte auf die Entmagnetisierungsstufe in Spalte 20 bezogen
- 24 Chemoremanente Magnetisierung (CRM): + = mit, - = ohne
- 25 zur Kernorientierung verwendete mittlere Deklination der Probe (Dm)
- 26 Eignung des Bohrkerns zur Orientierung: + = gut, ± = befriedigend, - = nicht geeignet

Anlage 2 Polpositionen für Eurasien vom Ordovizium bis zum Perm

| Lokalität | Alter | Paläo- magne- tischer Pol | Autor/Jahr | Nr. IRVING bzw. Mc ELHINNY | Lokalität | Alter | Paläo- magne- tischer Pol | Autor/Jahr | Nr. IRVING bzw. Mc ELHINNY | | | | | |
|-----------|-------|------------------------------------|------------|-------------------------------------|-----------|-------|------------------------------------|------------|-------------------------------------|--------|--------------|------|------|-----|
| SU | 59/51 | Po-Tr | 52/176 | CHRAMOV 1958 | II | 33 | Frankr. | 44/ 7 | P2 | 47/329 | BOBIER... | 1966 | X | 97 |
| Spanien | 43/1W | P -Tr | 51/227 | SCHWARZ 1963 | VII | 36 | Frankr. | 44/77 | P2 | 5/319 | BOBIER... | 1966 | X | 98 |
| Spanien | 43/1W | P -Tr | 8/305 | SCHWARZ 1963 | VII | 37 | SU | 54/87 | P2 | 6/153 | APARIN... | 1966 | X | 99 |
| SU | 76/11 | Po-Tr | 19/139 | VLASOV... 1964 | VIII | 78 | SU | 54/87 | P2 | 10/159 | APARIN... | 1966 | X | 100 |
| Frankr. | 48/ 6 | Pm ? | 43/168 | NAIRN 1957 | I | 82 | SU | 63/159 | P2 | 52/279 | PECHERSKIJ | 1970 | XII | 108 |
| Frankr. | 47/ 4 | Pm | 38/162 | NAIRN 1957 | I | 83 | Frankr. | 44/ 7 | P2 | 46/148 | VAN DER ENDE | 70 | XII | 110 |
| Italien | 46/11 | Pm-Po | 49/235 | DE BOER 1965 | IX | 68 | Italien | 46/11 | P2 | 42/237 | MANZONI | 1970 | XII | 111 |
| Italien | 46/12 | Pm-Po | 45/140 | DE BOER 1965 | IX | 77 | SU | 52/68 | P2 | 54/169 | KUMPAN u.a. | 1968 | XIII | 43 |
| SU | 58/55 | P2 | 46/173 | CHRAMOV 1958 | II | 34 | Frankr. | 47/ 4 | P1 | 54/185 | NAIRN | 1957 | I | 84 |
| SU | 58/56 | P2 | 43/181 | CHRAMOV 1958 | II | 35 | BRD | 49/ 7 | P1 | 53/183 | NAIRN | 1960 | IV | 15 |
| SU | | ∅ P2 | 45/178 | CHRAMOV 1958 | II | | BRD | 49/ 8 | P1 | 38/179 | NAIRN | 1960 | IV | 16 |
| SU | | ∅ P2 | 46/165 | CHRAMOV u.a. 1965 | - | | BRD | 49/ 8 | P1 | 45/185 | NAIRN | 1960 | IV | 17 |
| SU | | P2 | 48/165 | CHRAMOV | V | 38 | BRD | 48/ 8 | P1 | 33/150 | NAIRN | 1960 | IV | 18 |
| SU | 61/46 | P2 | 49/169 | CHRAMOV | V | 39 | SU | (56/93) | P1 | 43/157 | POPOVA | 1963 | VII | 38 |
| SU | 59/51 | P2 | 48/162 | CHRAMOV | V | 40 | Polen | 50/20 | P1 | 43/165 | BIRKENMAJER | 64 | VIII | 87 |
| SU | 54/52 | P2 | 45/171 | CHRAMOV | V | 41 | Spanien | 42/ 2 | P1 | 49/197 | VAN DONGEN | 1967 | IX | 80 |
| SU | 61/45 | P2 | 41/172 | CHRAMOV | V | 42 | Italien | 46/11 | P1 | 48/202 | DE BOER | 1965 | IX | 81 |
| SU | 57/54 | P2 | 45/167 | CHRAMOV | V | 43 | SU | 48/38 | P1 | 33/161 | CHRAMOV | | V | 46 |
| SU | 57/55 | P2 | 44/167 | CHRAMOV | V | 44 | Italien | 46/11 | P1 | 40/242 | DE BOER | 1965 | IX | 82 |
| SU | 56/55 | P2 | 43/168 | CHRAMOV | V | 45 | Italien | 46/11 | P1 | 54/222 | DE BOER | 1965 | IX | 83 |
| SU | 55/53 | P2 | 36/150 | ANDREEVA... 1965 | VIII | 82 | Italien | 46/11 | P1 | 50/244 | DE BOER | 1965 | IX | 84 |
| Italien | 45/11 | P2 | 53/241 | DE BOER 1965 | IX | 67 | SU | 53/92 | P1 | 37/155 | CHRAMOV | 1967 | IX | 85 |
| SU | 60/45 | P2 | 45/167 | CHRAMOV... 1967 | IX | 69 | SU | 49/38 | P1 | 37/161 | CHRAMOV | 1967 | IX | 86 |
| SU | 59/50 | P2 | 42/165 | CHRAMOV... 1967 | IX | 70 | SU | 48/38 | P1 | 41/165 | CHRAMOV | 1967 | IX | 87 |
| SU | 55/49 | P2 | 51/178 | CHRAMOV... 1967 | IX | 71 | GB | 51/4W (P1) | | 50/149 | ZIJDERVELD | 1967 | IX | 89 |
| SU | 54/53 | P2 | 42/167 | CHRAMOV... 1967 | IX | 72 | GB | 51/4W (P1) | | 46/165 | CORNWELL | 1967 | IX | 90 |
| SU | 57/54 | P2 | 40/163 | CHRAMOV... 1967 | IX | 73 | SU | (56/93) | P1 | 2/137 | APARIN... | 1966 | X | 103 |
| SU | 58/56 | P2 | 42/167 | CHRAMOV... 1967 | IX | 74 | SU | 52/68 | P1 | 51/160 | KUMPAN u.a. | 1968 | XIII | 44 |
| SU | 55/55 | P2 | 40/165 | CHRAMOV... 1967 | IX | 75 | SU | 44/70 | P1 | 63/189 | KUMPAN u.a. | 1968 | XIII | 45 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|--------|----|--------|-------------------|-------|------|-----------------|------------|---------|--------------------|--------------------|-------------|-------|------|-----|
| Italien | 46/11 | P1 | 46/236 | ZIJDERVELD u.a. | XIII | 48 | Rumänien | P | 36/160 | in HOSPERS...1970 | - | | | | |
| Italien | 46/11 | P1 | 45/238 | ZIJDERVELD u.a. | XIII | 49 | ČSSR | P | 32/157 | in HOSPERS...1970 | - | | | | |
| GB | 51/3W | P1 | 46/165 | CORNWELL | 1967 | XIII | 53 | BRD | P | 48/174 | KONRAD; NAIRN 1972 | - | | | |
| SU | ∅ | P1 | 43/160 | CHRAMOV u.a. | 1965 | - | SU | (56/93) | P | 43/157 | POPOVA | 1963 | - | | |
| SU - Donbaß | | P | 48/169 | TRETJAK | 1965 | - | Spanien/Frankr. | P | 40/126 | VAN DER VOO...1973 | - | | | | |
| ČSSR | 50/15 | P1 | 40/158 | KRS | 1967b | - | GB | 51/5W | Cs-P1 | 43/180 | BLUNDELL | 1957 | I | 98 | |
| ČSSR | 49/15 | P1 | 41/162 | KRS | 1967b | - | GB | 55/2W | Cs-P1 | 37/169 | CREER u.a. | 1959 | II | 36 | |
| ČSSR Sub-Krkonose | P1 | | 40/162 | KRS | 1967b | - | SU | 72/102 | Cs-P1 | 40/150 | GUSEV | 1959 | III | 55 | |
| ČSSR | 49/16 | P1 | 40/168 | KRS | 1967b | - | ČSSR | 50/14 | C -P? | 38/149 | KRS | 1969 | VIII | 94 | |
| ČSSR | 49/17 | P1 | 41/159 | KRS | 1967b | - | Korsika | 42/ 9 | Cs-P1 | 32/239 | ASWORTH... | 1965 | IX | 88 | |
| DDR Sedimentite | P1 | | 24/169 | ROTHER | 1971 | - | Schweden | 59/14 | Cs-P1 | 31/174 | PRIEM u.a. | 1968 | X | 107 | |
| DDR Sed.+Magm. | P1 | | 32/166 | ROTHER | 1971 | - | Schweden | 59/13 | Cs-P1 | 37/177 | PRIEM u.a. | 1968 | X | 108 | |
| GB | 51/4W | P | 43/164 | CREER | 1957 | I | 73 | Schweden | 56/14 | Cs-P1 | 37/174 | PRIEM u.a. | 1968 | X | 109 |
| GB | 55/5W | P | 36/175 | DU BOIS | 1957 | I | 74 | Polen | 51/17 | Cs-P2 | 43/174 | BIRKEM.u.a. | 1968b | XI | 71 |
| GB | 55/5W | P | 37/163 | DU BOIS | 1957 | I | 75 | Portugal | 40/8W | Cs-P1 | 36/212 | VAN DER VOO | 1969 | XI | 72 |
| GB | 55/5W | P | 31/174 | ARMSTRONGS | 1957 | I | 76 | Spanien | 38/6W | Cs-P1 | 42/216 | VAN DER VOO | 1969 | XI | 73 |
| Norwegen | 60/11 | P | 46/165 | RUTTEN u.a. | 1957 | I | 77 | Spanien | 38/6W | Cs-P1 | 41/208 | VAN DER VOO | 1969 | XI | 74 |
| Frankreich | 44/7 | P | 46/141 | ROCHE | 1957 | I | 78 | Korsika | 42/ 9 | Cs-P1 | 55/194 | NAIRN | 1968 | XI | 75 |
| Frankreich | 44/7 | P | 45/131 | RUTTEN u.a. | 1957 | I | 79 | Norwegen | 58/ 8 | Cs-P1 | 39/161 | HALVORSEN | 1970 | XII | 119 |
| Frankreich | 44/7 | P | 53/195 | ROCHE | 1957 | I | 80 | SU | 65/166 | C -P1 | 39/159 | PECHERSKIJ | 1970 | XII | 120 |
| Frankreich | 44/7 | P | 47/144 | AS; ZIJDERV. | 1958 | I | 81 | GB | 53/2W | Cs | 27/155 | CLEGG u.a. | 1957 | I | 96 |
| BRD | 50/8 | P | 42/174 | SCHMUCKER | 1959 | II | 37 | GB | 54/2W | Cs | 9/134 | CLEGG u.a. | 1957 | I | 97 |
| BRD | 50/8 | P | 46/167 | NIJENHUIS | 1961 | V | 36 | BRD | 49/ 7 | Cs | 41/185 | NAIRN | 1960 | IV | 23 |
| Norwegen | 60/10 | P | 47/157 | EVERDINGEN | 1960 | V | 37 | Frankreich | 47/5 | Cs | 33/185 | NAIRN | 1960 | IV | 24 |
| Frankreich | 54/6 | P | 41/169 | ROCHE u.a. | 1962 | VII | 35 | Frankreich | 45/5 | Cs | 33/184 | NAIRN | 1960 | IV | 25 |
| ČSSR | 50/17 | P | 18/282 | GREGOR... | 1964 | VIII | 83 | SU | (43/38) | Cs | 39/154 | CHRAMOV | | V | 48 |
| Belgien | 50/ 6 | P | 46/166 | DE MAGNEE... | 1963 | IX | 76 | SU | (48/38) | Cs | 39/179 | CHRAMOV | | V | 49 |
| Spanien | 42/ 2 | P | 57/232 | VAN DONGEN | 1967 | IX | 78 | SU | (55/38) | Cs | 32/153 | ANDREEVA | 1961 | VI | 54 |
| Spanien | 42/ 2 | P | 47/206 | VAN DONGEN | 1967 | IX | 79 | | | | 47/178 | | | | |
| SU | 43/132 | P | 16/196 | VLASOV... | 1963 | X | 102 | SU | 49/38 | Cs | 32/188 | CHRAMOV... | 1964 | VIII | 110 |
| Frankreich | 45/7 | P | 51/243 | ROCHE... | 1969 | XI | 68 | SU | 56/38 | Cs | 38/176 | BAGINA | 1966 | VIII | 111 |
| Sardinien | 41/ 9 | P | 20/271 | ZIJDERV.u.a. | 1970 | XII | 112 | SU | 48/38 | Cs | 39/174 | CHRAMOV | 1967 | IX | 92 |
| Sardinien | 41/ 9 | P | 38/239 | ZIJDERV.u.a. | 1970 | XII | 113 | SU | 56/39 | Cs | 42/168 | CHRAMOV | 1967 | IX | 93 |
| SU | 41/70 | P | 54/328 | ŠOLPO... | 1971 | XIII | 46 | SU | 48/38 | Cs | 50/182 | CHRAMOV | 1967 | IX | 94 |
| Frankreich | | P | 46/171 | in HOSPERS...1970 | - | | | SU | 48/41 | Cs | 25/186 | CHRAMOV | 1967 | IX | 95 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---------|----|--------|--------------|-------|------|-----|----|---------|----|--------|----------------------------------------------------------------|------|------|-----|
| SU | 52/63 | Cs | 59/198 | CHRAMOV | 1967 | IX | 96 | GB | 56/3W | Cd | 8/153 | CLEGG u.a. | 1957 | I | 99 |
| SU | 51/68 | Cs | 48/161 | CHRAMOV | 1967 | IX | 99 | GB | 56/3W | Cd | 11/158 | CLEGG u.a. | 1957 | I | 100 |
| SU | 56/62 | Cs | 22/160 | CHRAMOV | 1967 | IX | 100 | GB | 56/3W | Cd | 40/151 | CLEGG u.a. | 1957 | I | 101 |
| SU | 56/34 | Cs | 33/158 | CHRAMOV | 1967 | IX | 101 | GB | 53/2W | Cd | 46/105 | BELSHÉ | 1957 | I | 102 |
| SU | 55/39 | Cs | 34/170 | CHRAMOV | 1967 | IX | 102 | GB | 54/3W | Cd | 43/119 | DU BOIS | 1961 | V | 47 |
| SU | 55/38 | Cs | 29/155 | CHRAMOV | 1967 | IX | 103 | SU | 59/34 | Cd | 43/162 | CHRAMOV | | V | 50 |
| SU | 54/42 | Cs | 31/168 | CHRAMOV | 1967 | IX | 104 | SU | 59/34 | Cd | 43/161 | CHRAMOV | | V | 51 |
| SU | 48/31 | Cs | 33/190 | CHRAMOV | 1967 | IX | 105 | SU | 59/34 | Cd | 7/133 | CHRAMOV | | V | 52 |
| SU | 48/38 | Cs | 24/166 | CHRAMOV | 1967 | IX | 106 | SU | 54/57 | Cd | 22/150 | CHRAMOV | | V | 53 |
| SU | 48/38 | Cs | 28/177 | CHRAMOV | 1967 | IX | 107 | SU | 53/91 | Cd | 48/98 | | | V | 54 |
| SU | 48/38 | Cs | 23/171 | CHRAMOV | 1967 | IX | 108 | SU | 55/90 | Cd | 20/153 | | | V | 55 |
| Pol./ČSSR | 51/16 | Cs | 39/177 | BIRKENM.u.a. | 1968a | X | 111 | SU | 53/91 | Cd | 49/129 | VLASOV; KOVALENKO unveröff. in KALASHNIKOV 1961 | | V | 56 |
| ČSSR | 50/13 | Cs | 31/152 | BIRKENM.u.a. | 1968a | X | 112 | SU | 55/91 | Cd | 41/141 | | | V | 57 |
| ČSSR | 50/14 | Cs | 36/154 | BIRKENM.u.a. | 1968a | X | 113 | SU | 54/92 | Cd | 12/156 | | | V | 58 |
| GB | 56/2W | Cs | 44/159 | STORETV.... | 1969 | XI | 77 | SU | 54/92 | Cd | 46/110 | | | V | 59 |
| SU | 41/70 | Cs | 58/318 | ACHMATOV | 1966 | XIII | 54 | SU | 54/91 | Cd | 46/110 | | | V | 60 |
| SU | 44/70 | Cs | 63/189 | KUMPAN... | 1968 | XIII | 55 | GB | 56/3W | Cd | 18/161 | CREER | 1966 | VIII | 118 |
| SU | 52/68 | Cs | 65/180 | KUMPAN... | 1968 | XIII | 56 | SU | 56/62 | Cd | 28/229 | CHRAMOV | 1967 | IX | 109 |
| SU | 51/68 | Cs | 65/196 | KUMPAN... | 1968 | XIII | 57 | SU | 55/63 | Cd | 45/199 | CHRAMOV | 1967 | IX | 110 |
| SU | 50/70 | Cs | 65/193 | KUMPAN... | 1968 | XIII | 58 | SU | 60/34 | Cd | 47/160 | CHRAMOV | 1967 | IX | 111 |
| SU | 48/68 | Cs | 64/188 | KUMPAN... | 1968 | XIII | 59 | SU | 59/33 | Cd | 41/158 | CHRAMOV | 1967 | IX | 112 |
| SU | ∅ | Cs | 30/176 | CHRAMOV u.a. | 1965 | - | - | SU | 61/37 | Cd | 46/152 | CHRAMOV | 1967 | IX | 113 |
| SU | (48/28) | Cs | 41/178 | TRETJAK | 1965 | - | - | SU | 60/34 | Cd | 39/146 | CHRAMOV | 1967 | IX | 114 |
| SU | (48/28) | Cs | 32/183 | TRETJAK | 1965 | - | - | SU | 59/33 | Cd | 20/163 | CHRAMOV | 1967 | IX | 115 |
| SU | (48/28) | Cs | 26/173 | TRETJAK | 1965 | - | - | SU | 61/37 | Cd | 19/147 | CHRAMOV | 1967 | IX | 116 |
| SU | (55/28) | Cs | 39/165 | BAGINA | 1965 | - | - | SU | 54/88 | Cd | 18/162 | APARIN... | 1966 | X | 121 |
| ČSSR | 50/15 | Cs | 40/154 | KRS | 1967b | - | - | SU | 54/92 | Cd | 7/158 | APARIN... | 1966 | X | 122 |
| ČSSR | 49/16 | Cs | 40/169 | KRS | 1967b | - | - | SU | 54/91 | Cd | 38/134 | VLASOV u.a. | 1961 | X | 123 |
| ČSSR/Polen | | Cs | 37/176 | KRS... | 1968 | - | - | SU | (56/93) | Cd | 38/127 | POPOVA | 1963 | - | - |
| Schweden | | Cs | 31/174 | MULDER | 1971 | - | - | SU | ∅ | Cd | 34/158 | CHRAMOV u.a. | 1965 | - | - |
| Schweden | | Cs | 38/166 | MULDER | 1971 | - | - | GB | | Cd | 18/165 | BIDGOOD | 1961 | in | |
| Schweden | | Cs | 37/174 | MULDER | 1971 | - | - | | | | | McELHINNY; BRIDEN | 1971 | | |
| DDR | ∅ | Cs | 37/160 | ROTHER | 1971 | - | - | GB | | Cd | 26/169 | BRIDEN u.a. | 1970 | in | |
| GB | | Cs | 22/175 | TARLING... | 1973 | - | - | | | | | McELHINNY; BRIDEN | 1971 | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---------|----|--------|---------------|-------|------|-----|-------------|---------|--------|----------|--------------------------|------|------|-----|
| GB | 53/2W | C | 51/134 | BELSHÉ | 1957 | I | 103 | SU | (56/93) | D1 | 4/336 | POPOVA | 1963 | VII | 47 |
| GB | 53/3W | C | 32/135 | CLEGG u.a. | 1957 | I | 104 | Norwegen | 63/12 | D1 | 19/160 | STORETVEDT.. | 1966 | VIII | 124 |
| GB | 53/2W | C | 37/126 | NAIRN | 1960 | IV | 19 | GB | 57/2W | D1 | 10/321 | STUBBS | 1958 | VIII | 125 |
| GB | 54/2W | C | 20/161 | EVERITT... | 1960 | IV | 20 | GB | 52/3W | D1 | 3/298 | CHAMALAUN... | 1964 | VIII | 126 |
| GB | 56/3W | C | 41/112 | NAIRN | 1960 | IV | 22 | Schottl. | 57/2W | D1 | 1/121 | CREER... | 1967 | IX | 124 |
| SU | 56/62 | C | 28/229 | CHRAMOV | 1967 | IX | 109 | SU | 56/93 | D1 | 31/154 | VLASOV... | 1963 | X | 127 |
| SU | 54/88 | C | 7/314 | APARIN... | 1966 | X | 117 | SU | 55/95 | D1 | 29/166 | VLASOV... | 1963 | X | 128 |
| SU | 51/94 | C | 3/160 | APARIN... | 1966 | X | 118 | GB | 57/2W | D1 | 1/325 | McMURRY | 1970 | XII | 137 |
| SU | 51/68 | C | 67/196 | KUMPAN u.a. | 1968 | XIII | 60 | SU Podolien | | D1 | 31/167 | TRETJAK | 1965 | - | - |
| SU | 50/70 | C | 70/206 | KUMPAN u.a. | 1968 | XIII | 61 | GB | 55/2W | D1 | 11/320 | THORNING | 1974 | - | - |
| SU | 48/68 | C | 69/202 | KUMPAN u.a. | 1968 | XIII | 62 | | | | | | | | |
| Schottland | | C | 17/161 | WILSON... | 1963 | | | GB Wales | | D | 30/159 | CREER | 1957 | I | 114 |
| Rumänien | | C | 37/187 | PATRASCU u.a. | 1964 | | | BRD | 51/6 | D1-D2 | 42/136 | NAIRN | 1960 | IV | 29 |
| ČSSR | | C | 59/162 | BUCHA | 1965a | | | SU | 55/95 | D2-D3 | 24/157 | VLASOV u.a. | 1961 | V | 70 |
| SU | | C | 30/165 | BAGINA | 1966 | | | SU | 56/93 | D2-D3 | 30/146 | VLASOV u.a. | 1961 | V | 71 |
| GB | | C | 49/148 | ZIJDERVELD | 1967 | | | SU | 56/93 | D2-D3 | 28/152 | VLASOV u.a. | 1961 | V | 72 |
| | | | | | | | | SU | 56/93 | D2-D3 | 23/150 | VLASOV u.a. | 1961 | V | 73 |
| SU | 59/31 | D3 | 34/158 | LIN'KOVA | 1960 | IV | 26 | SU | 56/93 | D2 | 29/163 | VLASOV u.a. | 1961 | V | 74 |
| SU | 57/31 | D3 | 31/164 | LIN'KOVA | 1960 | IV | 27 | SU | 55/95 | D2 | 28/168 | VLASOV u.a. | 1961 | V | 75 |
| SU | 60/33 | D3 | 28/159 | LIN'KOVA | 1960 | IV | 28 | SU | 56/93 | D1-D2 | 32/162 | VLASOV u.a. | 1961 | V | 76 |
| SU | (56/93) | D3 | 22/150 | POPOVA | 1963 | VII | 43 | SU | 56/98 | D | 28/155 | VLASOV in KALASHNIKOV | 1961 | V | 78 |
| SU | 56/93 | D3 | 27/152 | POPOVA | 1963 | VII | 44 | SU | 56/93 | D2 | 32/162 | POPOVA | 1963 | VII | 45 |
| Schottl. | 56/3W | D3 | 23/169 | NAIRN | 1960 | IV | 31 | SU | 54/92 | D3-Cd | 25/134 | APARIN... | 1966 | X | 124 |
| GB | 51/4W | D3 | 32/149 | BLACK | 1964 | VIII | 119 | SU | 65/166 | D3-P1 | 42/165 | PECHERSKIJ | 1970 | XII | 130 |
| SU | 56/93 | D3 | 23/154 | VLASOV u.a. | 1961 | V | 67 | SU | 65/166 | D3-P1 | 30/135 | PECHERSKIJ | 1970 | XII | 131 |
| SU | 55/95 | D3 | 15/150 | VLASOV u.a. | 1961 | V | 68 | SU | 65/166 | D3-P1 | 45/153 | PECHERSKIJ | 1970 | XII | 132 |
| SU | 56/93 | D3 | 28/147 | VLASOV u.a. | 1961 | V | 69 | Norwegen | 61/6 | D2 | 22/170 | LIE u.a. | 1969 | XII | 134 |
| SU | 55/90 | D3 | 8/147 | APARIN... | 1966 | X | 125 | GB | 57/2W | D2-D3 | 24/150 | STORETVEDT.. | 1972 | XII | 137 |
| SU | 59/34 | D3 | 40/158 | LIN'KOVA in | | - | | SU | 60/61 | D | 35/147 | IVANOV in BRODSKAJA | 1960 | | |
| SU | 59/34 | D3 | 28/158 | BRODSKAJA | 1960 | - | | SU | ∅ | D | 32/161 | CHRAMOV | 1965 | - | |
| SU | 58/32 | D3 | 31/168 | LIN'KOVA | 1963 | - | | ČSSR | | D | 20/156 | CHLUPAC; KRS | 1967 | - | |
| GB | 52/3W | D1 | 31/111 | CLEGG u.a. | 1957 | I | 115 | Norwegen | ∅ | D | 20/160 | STORETVEDT | 1967 | - | |
| Schottl. | 57/3W | D1 | 29/136 | NAIRN | 1960 | IV | 30 | DDR | ∅ | D | (29/136) | ROTHER | 1971 | - | |
| SU | 55/95 | D1 | 39/154 | VLASOV u.a. | 1961 | V | 77 | GB | 57/1W | (C-D1) | 29/160 | KNEEN | 1973 | - | |
| SU | 56/93 | D1 | 25/163 | VLASOV... | 1963 | VII | 42 | GB | 60/2W | D2-D3 | 2/327 | MORRIS u.a. | 1973 | - | |
| SU | (56/93) | D1 | 32/162 | POPOVA | 1963 | VII | 46 | GB | 52/3W | D3-Cd | 32/158 | MORRIS u.a. | 1973 | - | |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|---------|---------|------------------|-------------------------------|-----------------|------|-----|-----------|--------|-------|--------|----------------|------------------|----|-----|
| SU | 67/66 | S | 16/140 | KOMAROV | 1959 | III | 69 | GB | 52/4W | O | 14/165 | NESBITT | 1967 | IX | 129 |
| SU | 49/26 | S | 14/124 | CHRAMOV u.a. | 1961 | VII | 48 | GB | 52/4W | O | 15/162 | NESSITT | 1967 | IX | 130 |
| SU | 49/26 | S | 40/160 | KRUGLJAKOVA in KALASHNIKOV | 1961 | VII | 49 | GB | 55/5W | O | 11/168 | NESBITT | 1967 | IX | 131 |
| SU | 61/116 | S | 0/101 | CHRAMOV in KALASHNIKOV | 1961 | VII | 50 | SU | 57/103 | O | 20/300 | RODIONOV | 1966 | X | 131 |
| SU | (56/93) | S | 13/312 | POPOVA | 1963 | VII | 51 | SU | 58/108 | O | 25/308 | RODIONOV | 1966 | X | 132 |
| Spanien | 41/3W | S | 36/203 | VAN DER VOO | 1967 | IX | 126 | SU | 60/118 | O | 21/308 | RODIONOV | 1966 | X | 133 |
| Spanien | 39/5W | S | 21/228 | VAN DER VOO | 1967 | IX | 127 | SU | 58/108 | O | 24/311 | RODIONOV | 1966 | X | 134 |
| Norwegen | 60/10 | So | 21/159 | STORETV.u.a. | 1968 | X | 129 | SU | 60/118 | O | 22/314 | RODIONOV | 1966 | X | 135 |
| SU | ∅ | S | 25/140 | CHRAMOV u.a. | 1965 | - | - | SU | 58/108 | O | 23/308 | RODIONOV | 1966 | X | 136 |
| SU | 67/66 | S-D1 | 22/141 | KOMAROV | 1957 | VI | 65 | SU | 60/118 | O | 27/314 | RODIONOV | 1966 | X | 137 |
| GB | 56/5W | S-D1 | 5/146 | BRIDEN | 1970 | XII | 138 | SU | 57/107 | O | 41/308 | RODIONOV | 1966 | X | 138 |
| GB | 56/5W | S-D1 | 8/144 | BRIDEN | 1970 | XII | 139 | SU | 57/104 | O | 42/311 | RODIONOV | 1966 | X | 139 |
| Irland | 54/10W | So | 3/323 | MORRIS u.a. | 1973 | - | - | SU | 51/ 26 | O | 21/153 | KOMAROV | in | - | - |
| Irland | 54/10W | So | 23/115 | MORRIS u.a. | 1973 | - | - | SU | 62/ 59 | O | 13/196 | KOMAROV | BRODSKAJA | - | - |
| Irland | 54/10W | So | 36/264 | MORRIS u.a. | 1973 | - | - | SU | 59/ 30 | O | 45/163 | CHRAMOV | 1960 | - | - |
| GB | 52/2W | Su | 9/287 | MORRIS u.a. | 1973 | - | - | SU europ. | ∅ | O | 24/144 | CHRAMOV u.a. | 1965 | - | - |
| GB | 52/5W | (Oo/Su) | 32/154 | BRIDEN u.a. | 1971 | XIII | 64 | SU sibir. | ∅ | O | 26/308 | CHRAMOV u.a. | 1965 | - | - |
| SU | 60/30 | O | 42/169 | CHRAMOV | 1958 | II | 38 | ČSSR | ∅ | O | 14/ 57 | BUCHA 1965 in | HOSPERS; | - | - |
| SU | 51/26 | O | 21/333 | KOMAROV | 1959 | III | 70 | Schweden | ∅ | O | 31/173 | MULDER 1967 in | HOSPERS; | - | - |
| SU | 51/26 | O | 28/ 46 | KOMAROV | 1959 | III | 71 | Irland | ∅ | O | 9/214 | VAN ANDEL 1970 | - | - | - |
| SU | (56/93) | O | 21/299 | POPOVA | 1963 | VII | 52 | DDR | ∅ | O | 13/150 | DEUTSCH... in | McELHINNY; | - | - |
| SU | 54/57 | O | 29/157 21/152 | CHRAMOV in RYAZANOVA | IVANOV; 1959 | V | 79 | Irland | 54/10W | Oo | 11/218 | BRIDEN 1971 | - | - | - |
| SU | 60/118 | O | 22/137 | CHRAMOV in KALSHNIKOV | 1961 | V | 80 | Irland | 54/6W | Oo | 42/121 | MORRIS; | ROBINSON 1971 in | - | - |
| ČSSR | 50/14 | O | 27/132 | BUCHA | 1965 | VIII | 129 | Irland | 54/6W | Oo | 33/164 | MORRIS u.a. | 1973 | - | - |
| ČSSR | 50/14 | O | 15/194 | ANDREEVau.a. | 1965 | VIII | 130 | GB | 52/3W | Oo | 2/ 2 | PIPER; BRIDEN | 1973 | - | - |
| ČSSR | 50/14 | O | 21/ 72 | BUCHA | 1965 | VIII | 132 | GB | 52/3W | Ou | 16/179 | PIPER; BRIDEN | 1973 | - | - |
| ČSSR | 50/14 | O | 9/ 62 | ANDREEVau.a. | 1965 | VIII | 133 | GB | 57/3W | Ou | 11/189 | SALLOMY; PIPER | 1973a | - | - |
| ČSSR | 50/14 | O | 16/179 | ANDREEVau.a. | 1965 | VIII | 134 | GB | 55/3W | Ou | 9/176 | BRIDEN; MORRIS | 1973 | - | - |
| ČSSR | 50/14 | O | 13/ 72 | ANDREEVau.a. | 1965 | VIII | 135 | GB | 55/3W | O(u?) | 23/188 | BRIDEN; MORRIS | 1973 | - | - |
| ČSSR | 50/14 | O | 21/ 74 | ANDREEVau.a. | 1965 | VIII | 136 | GB | 52/5W | Ou | 5/172 | MORRIS u.a. | 1973 | - | - |
| ČSSR | 50/14 | O | 9/ 48 | BUCHA | 1965 | VIII | 137 | GB | 52/5W | Ou | 2/119 | MORRIS u.a. | 1973 | - | - |

Tr - Trias; P - Perm; C - Karbon;
D - Devon; S - Silur; O - Ordovizium;

