

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ

GEOTECHNISCHE SERIE

herausgegeben von der

Schweizerischen Geotechnischen Kommission

(Organ der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft)

MATÉRIAUX POUR LA GÉOLOGIE DE LA SUISSE

SÉRIE GÉOTECHNIQUE

publiés par la

Commission Géotechnique Suisse

(Organe de la Société Helvétique des Sciences Naturelles)

Lieferung 66

Nagra Cédra Cisra

Technischer Bericht NTB 84-34

Die Kernbohrung Beznau

Nr. 7904 der NOK

(Gemeinde Döttingen, Kanton Aargau, Schweiz)

Nagra

Nationale Genossenschaft für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

1984

In Kommission bei Kümmerly & Frey AG, Geographischer Verlag, Bern
Druck: Helioprint AG, Zürich

Vorwort der Schweizerischen Geotechnischen Kommission

An der Sitzung vom 25. Januar 1984 wurde einem Antrag zugestimmt, die wissenschaftlichen Ergebnisse der Nagra-Bohrungen in den Beiträgen zur Geologie der Schweiz zu publizieren. Diese sehr detaillierten und in verschiedenen Hinsichten einmaligen Daten dürften von allgemeinem wissenschaftlichen Interesse, zudem aber auch für verschiedene geotechnische Probleme sehr aufschlussreich sein – so für Quellprobleme, Hydrogeologie usw. Der Bericht über die Bohrung Beznau eröffnet eine Reihe von Publikationen, welche das bisherige Bild der Geologie und die geotechnischen Eigenschaften des Untergrundes der Nordschweiz wesentlich ergänzen und zugleich in verschiedenen Punkten korrigieren werden.

Die Kommission dankt der Nagra dafür, dass sie diese Daten der Öffentlichkeit zugänglich macht und zudem die Druckkosten übernimmt.

Für den Inhalt von Text und Figuren sind die Autoren allein verantwortlich.

Der Präsident der
Schweizerischen Geotechnischen Kommission
C. Schindler

Inhaltsverzeichnis

Vorwort der Geotechnischen Kommission	3	4.3.3 Dilatometrie	39
Verzeichnis der Fototafeln	5	4.3.4 Wärmeleitfähigkeit	39
Verzeichnis der Tabellen	6	(L. Rybach, Institut für Geophysik der ETH Zürich)	
Verzeichnis der Beilagen	6	4.3.4.1 Messmethode	39
Zusammenfassung	7	4.3.4.2 Bestimmung der Anisotropie	40
Summary	10	4.3.4.3 Beschreibung der Messungen	40
1. Einleitung	14	4.3.4.4 Messresultate und Interpretation	40
1.1 Allgemeines	14	5. Anorganisch-geochemische Untersu- chungen an Bohrkernen	41
1.2 Lage der Bohrung	15	(Tj. Peters, Mineralogisch-petrographi- sches Institut der Universität Bern)	
1.3 Bohrmethode und Bohrdurchmesser	15	5.1 Hauptelemente	41
2. Geologischer Überblick	16	5.1.1 Methodik	41
3. Sedimentologische Untersuchungen an Bohrkernen	16	5.1.2 Ergebnisse	41
(A. Matter, Geologisches Institut der Universität Bern)		5.2 Kationenaustausch	42
3.1 Entnahme und Aufarbeitung der Proben	16	5.3 Radiometrische Bestimmung der Uran-, Thorium- und Kalium-Gehalte	43
3.2 Profilbeschreibung	16	(L. Rybach, Institut für Geophysik der ETH Zürich)	
3.2.1 Opalinus-Ton	17	5.3.1 Methodik	43
3.2.2 Jurensis-Mergel	17	5.3.2 Ergebnisse	43
3.2.3 Posidonienschiefer	18	6. Art und Reife des organischen Materials in Bohrkernen der mesozoischen Sedi- mente	54
3.2.4 Amaltheenschichten und Numismalis- Schichten	18	(P.K. Mukhopadhyay & D. Leythaeu- ser, Institut für Erdöl und Organische Geochemie [ICH-5], KFA Jülich GmbH, Jülich)	
3.2.5 Obtusus-Tone	18	6.1 Allgemeines	54
3.2.6 Arietenkalk und Angulatenschichten	19	6.2 Probenmaterial und Methodik	54
3.2.7 Insektenmergel	19	6.3 Art des organischen Materials	55
3.2.8 Obere bunte Mergel	19	6.4 Reife des organischen Materials	58
3.2.9 Gansinger-Dolomit	19	7. Genese von Kohlenwasserstoffen in den Lias- und Dogger-Sedimenten	65
3.2.10 Untere bunte Mergel	19	(R.G. Schaefer & D. Leythaeuser, Insti- tut für Erdöl und Organische Geochemie [ICH-5], KFA Jülich GmbH, Jülich)	
3.2.11 Schilfsandstein	20	7.1 Allgemeines	65
3.2.12 Gipskeuper	20	7.2 Probenmaterial und Methodik	65
3.2.13 Lettenkohle	22	7.3 Menge und Art des organischen Mate- rials in den Sedimenten des Lias und Dogger	66
3.2.14 Trigonodus-Dolomit	23	7.4 Menge und Zusammensetzung der nied- rigmolekularen Kohlenwasserstoffe	66
3.2.15 Plattenkalk	23	7.5 Menge und Zusammensetzung der schwerflüchtigen Kohlenwasserstoffe	71
3.2.16 Trochitenkalk	24	7.6 Zusammenfassung der Ergebnisse	72
3.2.17 Dolomit der «Anhydritgruppe»	24	8. Geophysikalische Bohrlochmessungen ..	78
3.2.18 Obere Sulfatschichten der «Anhydrit- gruppe»	25	(E. Wierczyko, Prakla-Seismos GmbH, Hannover)	
3.3 Korngrössenanalysen der tonigen Sedi- mente	25	8.1 Allgemeines	78
3.3.1 Methodik	25	8.2 Durchführung der Vermessung	78
3.3.2 Ergebnisse der Korngrössenanalyse	25	8.3 Deutung der bohrlochphysikalischen Messergebnisse	79
3.4 Porosimetrie	25	8.3.1 Elektrische Widerstandsmessung - Grosse 64"- und Kleine 16"-Normale	79
3.4.1 Gesteinsdichte und Korndichte	25	8.3.2 Eigenpotentialmessungen	79
3.4.2 Absolute Porosität	26	8.3.3 Salinometer-Log	79
3.4.3 Quecksilber-Druckporosimetrie	26	8.3.4 Gamma-Log	80
3.5 Permeabilität	27		
3.6 Oberfläche	27		
4. Mineralogische Untersuchungen an Bohrkernen	35		
(Tj. Peters, Mineralogisch-petrographi- sches Institut der Universität Bern)			
4.1 Mineralogie der Gesamtproben	35		
4.1.1 Methodik	35		
4.1.2 Ergebnisse	35		
4.2 Tonmineralogie	36		
4.2.1 Methodik	36		
4.2.2 Ergebnisse	36		
4.3 Thermochemie	38		
4.3.1 Differentielle Thermoanalyse (DTA)	38		
4.3.2 Thermogravimetrie (TG)	38		

8.3.5	Gamma-Gamma-Log	81	10.4	Lias	99
8.3.6	Neutron-Gamma-Log	82	10.5	Keuper	99
8.3.7	Akustik-Log	83	10.5.1	Wasserführung	99
8.3.8	Temperatur-Log	83	10.5.2	Druckverhältnisse	100
8.3.9	Wasserzuflussmessung	84	10.5.3	Chemismus	100
9.	Felsmechanische Untersuchungen	85	10.6	Oberer Muschelkalk	100
	(H.G. Locher, Terrexpert AG, Bern A. Thut, Solexperts AG, Schwerzen- bach)		10.6.1	Wasserführung	100
9.1	Allgemeines	85	10.6.2	Druckverhältnisse	103
9.2	Art und Umfang der Untersuchungen ...	85	10.6.3	Chemismus	103
9.3	Allgemeine Felskennwerte und einaxiale Druckversuche	85	10.7	Mittlerer Muschelkalk	103
9.4	Triaxiale Druckversuche	86	10.7.1	Wasserführung	103
9.5	Direkte Scherversuche	88	10.7.2	Druckverhältnisse	103
9.6	Schrumpf- und Quellverhalten	88	10.7.3	Chemismus	103
9.6.1	Einfluss der Temperatur	88	10.8	Gehalt der Tiefenwässer an gelösten Ga- sen und deren Zusammensetzung	104
9.6.2	Quellen im drucklosen Zustand in ver- schiedenen Medien	88	10.9	Chemismus der Keuper- und Muschel- kalkwässer in der Kernbohrung Nr. 7904, Beznau im Vergleich zu einigen an- dern schweizerischen Mineralquellen ...	104
9.6.3	Quellen im Oedometer	91	10.10	Untersuchungen nach Abschluss der Bohrung	104
9.6.4	Veränderungen mit der Tiefe	91	11.	Isotopenanalysen für Altersbestimmun- gen	105
9.7	In situ-Deformationsmessungen	91		(W. Balderer, H.H. Loosli, H. Oescher- ger, Physikalisches Institut der Universi- tät Bern, Abteilung Low Level Counting und Nukleare Geophysik)	
9.7.1	Messverfahren	91	11.1	Isotopenresultate an Wasserproben aus dem Gansinger-Dolomit (Keuper)	105
9.7.2	Auswertung und Ergebnisse	93	11.2	Isotopenresultate an Wasserproben aus dem oberen Muschelkalk	106
9.8	Felsmechanische Charakterisierung des Opalinus-Tons	95	11.3	Paläoklimatische Einflüsse	106
10.	Hydrogeologische Verhältnisse	96		Literaturverzeichnis	109
	(H. Jäckli & A. Rissi, Zürich)				
10.1	Quartäre Schichten	96			
10.1.1	Niederterrassenschotter	96			
10.1.2	Verschwemmtes Moränenmaterial	97			
10.2	Durchlässigkeitsverhältnisse	99			
10.3	Opalinus-Ton	99			

Verzeichnis der Fototafeln

			Seite
Fototafel 1	Wichtigste Strukturtypen von Anhydrit bzw. Gips im Gipskeuper und «Anhydritgruppe»		28
Fototafel 2	Sekundäre Porosität in den Kalken und Dolomiten des Muschelkalks		29
Fototafel 3	REM Aufnahmen von Neubildungen im Porenraum		30

Verzeichnis der Tabellen

			Seite
Tabelle 1	Gesteinsdichte, Korndichte und absolute Porosität		31
Tabelle 2	Quecksilber-Druckporosimetrie: Offene Makro- und Mikroporosität und Spez. Oberfläche		32
Tabelle 3	Äussere Oberfläche und Spez. Oberfläche toniger Proben		33
Tabelle 4	Gehalte an Karbonat- und Sulfatmineralien von Einzelproben des Keuper- und Muschelkalks		34
Tabelle 5	Röntgenographisch bestimmter Mineralgehalt der Gesamtproben		44
Tabelle 6	Röntgenographisch bestimmte Tonmineralverhältnisse in der dekarbonatisierten Fraktion ≤ 2 Mi- kron in %		45
Tabelle 7	Wärmeleitfähigkeitsbestimmungen		46
Tabelle 8	Mittelwerte der Wärmeleitfähigkeit für die Formationen		47
Tabelle 9	Untersuchung der Tiefenabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit [z(m)]		47
Tabelle 10	Chemische Analysen von Durchschnittsproben von Opalinus-Ton über jeweils ca. 4 m in Gew.-% ..		48
Tabelle 11	Chemische Analysen von Lias- und Triasproben		49
Tabelle 12	Gehalte an organischem und an CO_2 gebundenem Kohlenstoff, Schwefel, Stickstoff und C_{org} / N-Verhältnisse		50/51
Tabelle 13	Umtauschkapazität (UK) in mval/100 g, austauschbare Kationen und Ionenbelegung		52
Tabelle 14	Gammaskopmetrische Messungen		53
Tabelle 15	Geochemische Daten zur Kerogen-Charakterisierung aufgrund von Rock-Eval-Pyrolysemessungen an Kernproben		57

Tabelle 16	Mazeralzusammensetzung der Kerogenkonzentrate aus Kernproben	59
Tabelle 17	Reflexionsmikroskopisch ermittelte Reifeparameter für Kernproben	60
Tabelle 18	Organischer Kohlenstoffgehalt, Rock-Eval-Pyrolysedaten und Konzentrationen leichtflüchtiger Kohlenwasserstoffe (Bestimmung durch Wasserstoff-Elution bei Raumtemperatur)	67
Tabelle 19	Gehalt und Zusammensetzung des löslichen organischen Materials (C ₁₅₊) ausgewählter Kernproben	73
Tabelle 20	CPI-Werte («Carbon Preference Indices») und Isoprenoidkohlenwasserstoff-Konzentrationsverhältnisse für die gesättigten Kohlenwasserstoff-Fractionen ausgewählter Kernproben	73
Tabelle 21	Quellverhalten von Opalinus-Tonproben im drucklosen Zustand in verschiedenen Medien	92
Tabelle 22	In situ-Deformationsmessungen – Zusammenstellung der Deformationsmoduli	94
Tabelle 23	Chemische Analyse des Grundwassers aus dem Niederterrassenschotter der Kernbohrung Nr. 7904, Beznau	97
Tabelle 24	Abpressversuche mit Doppelpacker im unverrohrten Bohrlochabschnitt	98
Tabelle 25	Chemische Analysen des Porenwassers aus dem Opalinus-Ton	100
Tabelle 26	Chemische Analysen von Wasser aus dem Gansinger-Dolomit und dem Muschelkalk	101
Tabelle 27	Gehalt und Zusammensetzung der gelösten Gase in Wasserproben	102
Tabelle 28	Manometerablesungen an der Kernbohrung Nr. 7904, Beznau	105
Tabelle 29	Isotopenbestimmung an Grundwasserproben der Kernbohrung Nr. 7904, Beznau	108

Verzeichnis der Beilagen

Beilage 1	Bohrprofil
Beilage 2	Lithologisches Detailprofil 1:250
Beilage 3	Lithologisches Übersichtsprofil mit wichtigsten mineralogischen und petrophysikalischen Daten
Beilage 4	Quecksilber-Druckporosimetrie. Opalinus-Ton
Beilage 5	Quecksilber-Druckporosimetrie. Jurensis-Mergel-Obere bunte Mergel
Beilage 6	Quecksilber-Druckporosimetrie. Obere bunte Mergel-Plattenkalk
Beilage 7	Röntgendiffraktogramme der Fraktion ≤ 2 Mikron
Beilage 8	Differential-Thermoanalysen
Beilage 9	Thermogravimetrie
Beilage 10	Dilatometrie Opalinus-Ton
Beilage 11	Vergleichende Darstellung von Gamma-Log, Gamma-Gamma-Log und Akustik-Log
Beilage 12	Vergleichende Darstellung von Neutron-Gamma-Log und Elektrik-Log 16" - und 64" -Normale
Beilage 13	Wasserzufluss bei 106,8 m Tiefe
Beilage 14	Wasserzuflüsse zwischen 203 m und 321 m
Beilage 15	Gamma-Log 20–66 m
Beilage 16	Gamma-Log gemessen im unverrohrten Bohrloch 0–130 m

Zusammenfassung

Im Winter 1979/80 liessen die Nordostschweizerischen Kraftwerke AG anlässlich einer Überprüfung der Erdbebensicherheit ihrer auf der Aareinsel Beznau stehenden zwei Kernkraftwerke rund 75 m nordnordöstlich des Reaktorgebäudes II auf Koordinaten 659491/267242 eine vertikale Kernbohrung von 321,8 m Tiefe abteufen.

Da diese Bohrung auch für das Untersuchungsprogramm der Nagra in der Nordschweiz wichtige Ergebnisse versprach, wurde sie sowohl mit sedimentologischen, mineralogischen und geochemischen als auch geophysikalischen, hydrogeologischen, felsmechanischen und isotonenphysikalischen Methoden untersucht. Es ist dies in der Schweiz die erste Tiefbohrung, die in solchem Ausmass wissenschaftlich ausgewertet wurde.

Die lückenlos gekernte Bohrung durchteufte unter 20,3 m mächtigen Niederterrassenschottern über eine Strecke von 301,5 m die nahezu horizontale Schichtreihe des Tafeljura vom mittleren Opalinus-Ton bis in die Oberen Sulfatschichten der «Anhydritgruppe» des mittleren Muschelkalks.

Der unter einer pleistozänen Erosionsfläche einsetzende noch rund 45 m mächtige mittlere und untere Abschnitt des Opalinus-Tons (oberes Toarcien-Aalenien) besteht aus scheinbar monotonen, grauen, feinlaminierten siltigen Tonen und tonigen Siltsteinen mit einem CaCO_3 -Gehalt von etwa 10%. Mittels lithologischer Kriterien konnte der Abschnitt in 6 Faziestypen gegliedert werden, wobei seine unterste Partie, wegen der in den Bohrkernen gefundenen Ammoniten der Spezies *Pleydellia*, ins obere Toarcien zu stellen ist. Nach unten wird der Opalinus-Ton toniger, was sich einerseits durch Abnahme von Gesteinsdichte, Quarzgehalt und Mikroporosität, andererseits durch Zunahme der spezifischen Oberfläche und des Al_2O_3 -Gehalts ausdrückt. Auch nimmt der Gehalt an C_{org} linear mit der Tiefe zu.

Der obere Lias (unterster Opalinus-Ton 12,36 m, Jurensis-Mergel 3,43 m und Posidonien-schiefer 5,93 m) ist durch Tone, Kalkmergel und kalkige Tone vertreten, wobei in den Posidonien-schiefern stark bituminöse Lagen mit bis zu 9% C_{org} vorkommen. Der mittlere Lias (2,19 m) besteht aus einer lückenhaften Schichtfolge von glaukonitischen fossilreichen Mikriten. Der untere Lias wird aufgebaut aus 13,66 m tonigen Siltsteinen der Obtusus-Tone, 1,14 m tonigem Biomikrit und Fe-Oolith des Arietenkalks und feingeschichteten Tonen der Angulatenschichten sowie 6,38 m feingeschichteten bituminösen (0,5% C_{org}) Insektenmergeln.

Die Oberen und Unteren bunten Mergel (12,06 m) des obersten Keuper sind als bröcklige Dolomit-Mergel ausgebildet. Der zwischengelagerte Gansinger-Dolomit (4,16 m) fällt vor allem durch seine Dolomitbreccien und viele Lösungsporen auf.

Die Tonmineral-Vergesellschaftung der Dogger- und Liasschichten bis zu den Oberen bunten Mergeln ist mit Illit, Kaolinit, Chlorit und Wechsellagerung Illit/Montmorillonit sehr einheitlich, mit einem höheren Kaolinit-Anteil in den tonreichen Gesteinen. In den Proben der Oberen bunten Mergel fehlt Kaolinit, und die Gehalte an Illit und Illit/Montmorillonit-Wechsellagerung sind hoch. In den Unteren bunten Mergeln findet man neben Illit nur Chlorit.

Der Schilfsandstein (16,5 m) lässt sich in eine obere kleinzyklische Serie, einen mittleren massiven, porösen Feinsandstein und eine basale tonig-siltige Serie gliedern, wobei der Tonanteil der einzelnen Schichtglieder zwischen 25 und 60% schwankt. Die Tonmineralien-Assoziation setzt sich aus Illit, Kaolinit (beide z.T. authigen in Poren), Chlorit und Illit/Montmorillonit-Wechsellagerung zusammen.

Der Gipskeuper (85,15 m) besteht neben Tonen und Dolomiten aus Anhydrit in verschiedenen strukturellen Erscheinungsformen. Die sedimentologischen Untersuchungen erlauben, die komplexe Formation in 7 Untereinheiten zu gliedern. Die vorherrschend evaporitische Fazies ist, wie auch im obersten Teil der «Anhydritgruppe», nur in der Kontaktzone zu den liegenden und hangenden porösen, wasserführenden Gesteinen als Gips ausgebildet. Als charakteristisches Tonmineral des Gipskeuper tritt Corrensit auf.

Aufgrund fazieller Überlegungen wird die Lettenkohle (4,0 m) dem oberen Muschelkalk zugeordnet. Sie besteht aus einer Verzahnung von Grenzdolomit und wenig mächtigen Estherien-schiefern. In dieser Abfolge ist Kaolinit neben Illit das einzige Tonmineral.

Im Troionodus-Dolomit (34,5 m) wurde nahe der Obergrenze der im Schweizer Jura weitverbreitete Leithorizont, ein Hornstein führender Dolomit mit begleitendem Oolith, in den Bohrkernen ebenfalls gefunden. Darunter liegen die 9,6 m mächtigen Kaistener Schichten, eine Abfolge poröser Dolomite mit bioklastischen Lagen, die von massigem bis plattigem feinkristallinem Dolomit unterlagert werden. Auffällig ist die hohe Makroporosität des Trigonodus-Dolomits, verursacht durch Drusen, Klüfte und gelöste Fossilschalen. Die Poren sind z. T. mit Calcitkristallen ausgekleidet und öfters mit weissem Kaolinit gefüllt.

Der Plattenkalk (17,35 m) ist eine Wechsellagerung von Dolomit und Mikrit mit 3,45 m mächtigen Lamellibranchier-Crinoiden-Biomikriten an der Basis.

Der Trochitenkalk (19,2 m) zeigt nur in den obersten Metern Trochitenfazies. Vorherrschend sind graue Mikrite mit einer basalen Oolithbank.

Von der «Anhydritgruppe» des mittleren Muschelkalks wurden der Dolomit und bis zum Abschluss der Bohrung ein Teil der Oberen Sulfatschichten durchteuft. Der Dolomit der «Anhydritgruppe» (11,45 m) ist ein beiger, oft stromatolithischer Dolomit mit Rauhwanne- und Breccienlagen und einer sehr hohen sekundären Porosität. Diese ist hauptsächlich auf Lösung von Gips- bzw. Anhydritkristallen und -knöllchen zurückzuführen. Die Oberen Sulfatschichten (18,95 m durchbohrt) bestehen aus dolomitischen und teilweise evaporitischen Mergeln, die von geschichtetem bis massigem Anhydrit unterlagert werden.

Die Gehalte an radioaktiven Elementen sind in den Gesteinen der Bohrung durchweg niedrig. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der integralen Gamma-Aktivität, unterteilt in K-, U- und Th-Strahlungsintensität, mit dem Gamma-Log. Die mit der Tiefe kontinuierlich zunehmende Radioaktivität im Opalinus-Ton ist durch die Zunahme aller Radioelemente bedingt. Dabei leistet Uran den kleinsten Beitrag zur Gesamtaktivität.

Die Messungen der Wärmeleitfähigkeit parallel und senkrecht zur Schichtung zeigen Werte ($W/m^{\circ}K$), wie sie für die verschiedenen Gesteinsarten als typisch gelten. Die Mittelwerte liegen für K = zwischen 1,14 (Insektenmergel) und 4,07 (Obere Sulfatschichten). Die grossen Schwankungen in gewissen Formationen sind auf deren lithologische Inhomogenität zurückzuführen. Die Wärmeleitfähigkeit tonhaltiger Formationen, insbesondere des Opalinus-Tons, ist deutlich von der Tiefe abhängig.

Die Kationen-Austauschkapazität aller untersuchten Proben variiert von 15 bis 28 mval/100 g und ist vor allem an Illit und Illit/Montmorillonit-Wechsellagerung und im Gipskeuper auch an Corrensit gebunden. Die Porosität von Tonen und Mergeln beträgt je nach Tongehalt 5–10%, wobei der kommunizierende Porenanteil mit Schwerpunkt bei 70% zwischen 50 und 99% schwankt. Das Häufigkeitsmaximum der Porenradien liegt bei 100 Å. Hohe Makroporositäten wurden im Gansinger-Dolomit und im Dolomit der «Anhydritgruppe» beobachtet. Die Dehnungsmessungen an Opalinus-Tonproben ergaben sowohl parallel wie senkrecht zur Schichtung lineare Ausdehnungskoeffizienten um 10×10^{-6} .

An polierten Anschliffen von Konzentraten organischer Partikel aus 15 Kernproben aus Jura und Trias wurde die Art des organischen Materials und, anhand von Vitritreflexionsmessungen, sein Reifegrad bestimmt. Die meisten der untersuchten Proben führen ein wasserstoffarmes Kerogen mit einem niedrigen H/C-Verhältnis. Nur die Proben aus dem Posidonienschiefer und dem Dolomit der «Anhydritgruppe» (mm-dünne algenreiche Zwischenlagen) enthalten ein Kerogen mit erhöhten H/C-Werten. Aus der Variation des Mittelwertes aller Vitritreflexionsmessungen mit der Tiefe liess sich ein Reifegradient von 0,10% $R_m/100$ m ermitteln. Die einzige aufgrund ihrer Kerogenqualität als potentiell Erdölmuttergestein in Frage kommende Formation ist der Posidonienschiefer, dessen organisches Material einen Reifegrad erreicht hat, der dem Beginn des Stadiums der Erdölgenese entspricht.

Diese durch die Charakterisierung des organischen Materials erzielten Ergebnisse werden weitgehend bestätigt durch die Messung von Gehalt und Zusammensetzung der leicht- und

schwerflüchtigen Kohlenwasserstoffe (C_2-C_7 bzw. C_{15+}), die aus tonigen Gesteinen des Lias und Dogger extrahiert wurden. Aus der Zusammensetzung der Fraktion der niedrigmolekularen Kohlenwasserstoffe lässt sich ausserdem eine Verwitterung der obersten 18,16 m des Opalinus-Tons erkennen, die aus der Untersuchung der Minerale dieser Zone allein nicht ersichtlich ist.

Die Bohrung wurde über ihre ganze Länge bohrlochgeophysikalisch untersucht. Dabei kamen neben elektrischen, radiometrischen und akustischen Verfahren auch Sonden zum Messen von Bohrlochtemperatur, Bohrlochgeometrie und Wasserführung zum Einsatz.

Die elektrischen Widerstands-Logs wie auch die radiometrischen Logs bestätigen weitgehend die durch sedimentologische Kernanalysen festgelegten Schichtgrenzen. Das Gamma-Log zeigt relativ hohe Gammastrahlenintensitäten in glaukonithaltigen Schichten des oberen Lias und in Tonen und Tonmergeln des oberen Keuper. Die aus dem Gamma-Gamma-Log interpretierten Dichtewerte für verschiedene Gesteinstypen stimmen im allgemeinen gut mit den im Labor an Kernproben ermittelten Werten überein. Das Neutron-Gamma-Log zeigt sowohl im unverrohrten als auch im verrohrten Bohrlochabschnitt eine bemerkenswerte Analogie im Kurvenverlauf mit dem elektrischen Widerstands-Log. Aus dem Akustik-Log liessen sich für die verschiedenen im Bohrloch durchteuften Gesteine genaue charakteristische Geschwindigkeitswerte der Longitudinalwellen bestimmen. Im Bereich bis 200 m Tiefe weist einzig der harte Gansinger-Dolomit Werte über 4000 m/s auf. Unterhalb 200 m liegen die Schallgeschwindigkeiten, mit Ausnahme des stark porösen oberen Trigonodus-Dolomits sowie geklüfteter und brecciöser Intervalle in der oberen «Anhydritgruppe», durchwegs über 4000 m/s.

Aus den Temperatur-Logs lässt sich zwischen 30 m und 130 m Tiefe ein langsamer Temperaturanstieg von $0,04\text{ }^\circ\text{C/m}$ auf $0,07\text{ }^\circ\text{C/m}$ errechnen. Im wahrscheinlich ungestörten Bohrlochbereich zwischen 314 m und der Endteufe bei 321,8 m beträgt der Temperaturgradient $0,038\text{ }^\circ\text{C/m}$ bei einer Maximaltemperatur von $28,16\text{ }^\circ\text{C}$.

Die Kombination von Temperatur-, Salinometer-, Kaliber- und Flowmeter-Log erlaubte, die Wasserzutritte im Bohrloch genau zu orten und die einzelnen Fliessmengen zu berechnen. Die auf dem Kaliber-Log angezeigten Bohrlochausweitungen im Muschelkalk bei 230 m und 300 m Tiefe korrelieren mit den in diesen Bereichen festgestellten Wasserzuflüssen aus stark porösen, z. T. brecciösen Dolomitlagen.

Die an Proben aus dem Opalinus-Ton und in situ durchgeführten felsmechanischen Untersuchungen zeigen, dass der Opalinus-Ton, von seinen mechanischen Eigenschaften her gesehen, als Festgestein bzw. Fels zu bezeichnen ist. Die ermittelten Kennwerte weisen zwar beträchtliche Streuung, aber keine sprunghaften Änderungen auf. Mit zunehmender Tiefe ist die Veränderungstendenz nur geringfügig. Dies bestätigt den relativ homogenen lithologischen und mineralogischen Aufbau der erbohrten 45,4 m dieser Formation. Die mit 9 In-situ-Messungen bestimmten Deformationsmoduli zeigen ab 38 m ziemlich einheitliche Durchschnittswerte. Die beträchtlich niedrigeren Moduli in 26,5 m und 32,5 m Tiefe sind im ersten Fall vermutlich auf Verwitterungserscheinungen, im zweiten Fall auf eine kluffreiche Störzone zurückzuführen.

Charakteristisch für das untersuchte Gestein sind die geringe Druck- und Scherfestigkeit vor allem in Richtung der Schichtflächen und die ausgesprochene Quell tendenz.

Unter dem nutzbaren Grundwasserstrom in den Niederterrassenschottern des Aaretals wurden in der Bohrung nur in der Trias wasserführende Lagen angetroffen. Es sind dies der Gansinger-Dolomit (leicht subartesisch gespannt, $3,0\text{ l/min}$ im Kleinpumpversuch), die oberste Partie des Trigonodus-Dolomits (Ausfluss ca. $16,1\text{ l/min}$), der Trochitenkalk (Ausfluss ca. $6,8\text{ l/min}$) und der Dolomit der «Anhydritgruppe» (Ausfluss ca. $10,4\text{ l/min}$). Sämtliche Muschelkalkwässer sind artesisch gespannt. Der Überdruck reicht in allen wasserführenden Lagen bis ca. 15 m über Terrain. Die aus dem Muschelkalk an der Oberfläche ausfliessende Gesamtmenge betrug etwa $33,3\text{ l/min}$, bei einer mittleren Mischtemperatur von rund $22\text{ bis }23\text{ }^\circ\text{C}$.

Bei einer Gesamtmineralisation von 14683 mg/l ist das Wasser aus dem Gansinger-Dolomit als ein Na-Ca-Mg-SO₄-Cl-Subthermalwasser mit Li, F, J, Fe und Br chemisch charakterisiert. Die unter sich chemisch sehr ähnlichen Muschelkalkwässer zeigen dagegen eine wesentlich geringere Gesamtmineralisation von $6124\text{ bis }6951\text{ mg/l}$. Es sind Na-Ca-Mg-SO₄-Cl-Thermalwässer mit Li,

Fe, F und Br und einer Wassertemperatur in den einzelnen Aquiferen von 26 °C bis 27,3 °C. Chemisch sind sie am ehesten mit den Thermalwässern von Baden zu vergleichen.

Die Analysen der in den Muschelkalkwässern gelösten Gase ergaben einen relativ hohen Prozentanteil von Helium, das vermutlich aus dem Kristallin des Grundgebirges stammen könnte.

Insgesamt wurden an 6 Grundwasserproben aus der Bohrung Isotopenbestimmungen durchgeführt. Diese Isotopenmessungen sollten zu ihrer Deutung in einen grösseren regionalen Rahmen gestellt werden, was erst nach Vorliegen der Ergebnisse der Isotopenbestimmungen an tiefen Grundwässern aus den Sondierbohrungen sowie des regionalen Untersuchungsprogramms der Nagra in der Nordschweiz möglich sein wird. Als vorläufige und noch mit Unsicherheiten behaftete Aussage kann für das Wasser aus dem Gansinger-Dolomit aufgrund der ^{14}C -Bestimmung eine Verweilzeit von mindestens einigen 1000 Jahren vermutet werden. Die Verweilzeit der Muschelkalkwässer ist nach dem ^{39}Ar -Resultat sicher grösser als 1000 Jahre und nach den ^{14}C -Messungen gemäss den heute verwendeten Modellen grösser als 20000 Jahre. Eine wesentliche Frischwasserbeimischung kann für die Muschelkalkwässer aufgrund der ^3H -, ^{85}Kr -Resultate nicht nachgewiesen werden.

Summary

On the occasion of a review of safety aspects related to possible earthquake occurrences in the area of the two nuclear power reactors at Betznau, several shallow boreholes were drilled on behalf of Nordostschweizerische Kraftwerke AG on Beznau island in the river Aare during winter 1979/80. One of the borings (coord. 659491/267242) located approx. 75 m NNE of reactor building II was cored over its total length and taken to a greater depth of 321,8 m.

Because this well offered a good opportunity to gather important results for the research programme of Nagra in northern Switzerland, it was investigated in a very comprehensive way with sedimentological, mineralogical and geochemical methods and with geophysical, rock-mechanical, hydrogeological and radio-isotope techniques. This is the first deeper borehole drilled in Switzerland that has been evaluated to such a great extent.

Below a 20,3 m thick layer of Quaternary deposits, 301,5 m of an almost horizontal sedimentary series of the Tabular Jura was penetrated. This series extends from the lower Dogger (middle part of the «Opalinus-Ton») into the Triassic middle Muschelkalk («Obere Sulfatschichten» of the «Anhydritgruppe»).

A 45 m thick sequence of the middle and lower «Opalinus-Ton» (upper Toarcian-Aalenian) underlies the Pleistocene erosion surface. It consists of a series of seemingly monotone, grey, finely laminated silty clays and clayey siltstones with a CaCO_3 content of approx. 10%. The whole interval can be subdivided into 6 distinct types of lithological facies. The clay content of the formation increases with depth. This is demonstrated, on the one hand, by decreases in rock density, quartz content and microporosity and, on the other hand, by increasing values for specific surface and Al_2O_3 content. The organic carbon content also shows a linear increase with depth.

On the evidence of ammonites of the species *Pleydellia* found in some of the cores, the lowermost beds (12,36 m) of the «Opalinus-Ton» must be placed in the upper Toarcian.

In addition to this Liassic part of the «Opalinus-Ton» the Upper Lias («Jurensis-Mergel», 3,43 m, and «Posidoninenschiefer», 5,93 m) is represented by marlstones and calcareous clays. Strongly bituminous layers with up to 9% C_{org} occur in the «Posidonienschiefer». The Middle Lias (2,19 m) consists of an incomplete sequence of glauconitic fossiliferous micrites. The Lower Lias is represented by 13,66 m thick clayey siltstones («Obtusus-Tone»), 1,14 m of clayey biomicrites, ferruginous oolites («Arietenkalk») and thin bedded clays («Angulatenschichten») and 6,38 m thick bituminous (0,58% C_{org}) marls («Insektenmergel»).

The 12,06 m thick «Obere» and «Untere bunte Mergel» of the uppermost Keuper are developed as crumbly dolomitic marls. Intercalated in these marls is the 4,16 m thick «Gansinger-Dolomit» with its characteristic dolomite breccias and numerous solution vugs.

The clay mineral association in the sediments of the Dogger, Lias and uppermost Keuper consists very uniformly of illite, kaolinite, chlorite and interstratified illite/montmorillonite. The more clayey rocks are characterized by a higher proportion of kaolinite. In the samples of the «Obere bunte Mergel» there is no kaolinite, whereas the proportion of illite and interstratified illite/montmorillonite is high. In the «Untere bunte Mergel» only chlorite in addition to illite was found.

The 16,5 m thick «Schilfsandstein» (Middle Keuper) can be subdivided into an upper micro-cyclic series, a middle interval of massive, porous and fine-grained sandstones and a clayey-silty series at its base. The clay minerals form an association of illite, kaolinite (both partly authigenic in pores), chlorite and interstratified illite/montmorillonite.

The 85,15 m thick interval of the «Gipskeuper» is composed of clays, dolomites and mainly anhydrites in different structural manifestations. Sedimentological analysis permits the subdivision of this complex formation into 7 sub-units. The evaporitic facies is dominant. Only at the contact to the porous, water-bearing rocks of the overlying and underlying formations, are the anhydrites replaced by gypsum. Corrensite is the characteristic clay mineral of the «Gipskeuper».

Based on facies considerations the 4,0 m thick «Lettenkohle» forms part of the upper Muschelkalk. It consists of an interfingering of the so-called «Grenzdolomit» with the thin «Estherienschiefer». In this succession, illite and kaolinite are the only clay minerals.

Close to the upper boundary of the «Trigonodus-Dolomit» (34,5 m), a chert containing dolomite layer with accompanying oolite was found in the cores. This key horizon is widespread in the Swiss Jura mountains. Underneath follows a 9,6 m thick sequence of porous dolomites with bioclastic intercalations, the so-called «Kaistener Schichten». They are underlain by massive to thinly bedded, finely crystalline dolomites. The strikingly high macroporosity of the «Trigonodus-Dolomit» is caused by vugs, joints and dissolved fossil shells. The pores are partly lined with crystals of calcite and frequently filled with white kaolinite.

The «Plattenkalk» (17,35 m) comprises interbedded dolomite and micrite. A 3,45 m thick biomicrite containing lammelibranchs and crinoids forms its base.

The «Trochitenkalk» (19,2 m) is developed in trochitic facies only in its uppermost part. Grey micrites are predominant with an oolite bed at the base.

The «Anhydritgruppe» of the middle Muschelkalk was penetrated in part only. It is composed of 11,45 m of beige-coloured, frequently stromatolitic dolomites with layers of cellular dolomite (Rauhacke) and breccias displaying very high secondary porosity. This porosity is caused by dissolution of crystals and small nodules of anhydrite respectively gypsum.

The borehole reached its final depth in the «Obere Sulfatschichten» of the middle Muschelkalk after drilling through an 18,95 m thick section of this formation. It is composed of dolomitic and partly evaporitic marls which are underlain by massive anhydrite.

The content of radioactive elements in the rocks is low throughout. There is very good agreement between integral gamma-activity (broken down into K-, U- and Th-radiation intensity) and gamma-ray-log. In the interval of the «Opalinus-Ton» the radioactivity continuously increases with depth. This is due to the increase of all radioactive elements, whereby uranium accounts for the smallest contribution to the total activity.

Measurements of heat conductivity parallel and vertical to the bedding planes gave values that are considered typical for the different kinds of rock encountered in the well. The mean values measured in W/m^{°K} lie between 1,14 («Insektenmergel») and 4,07 («Obere Sulfatschichten»). The pronounced variations within certain formations are caused by their lithological inhomogeneity. The heat conductivity of the clayey formations is clearly dependent on depth, as demonstrated by the values for the «Opalinus-Ton».

The cation-exchange capacity of all the analysed samples varies between 15 and 28 mval/100 g. It is primarily determined by illite and interstratified illite/montmorillonite but also by cor-

rensite («Gipskeuper»). The porosity of clays and marls is dependent on the clay content of the sample and lies between 5% and 10%. The proportion of interconnected pores varies between 50% and 99%, with 70% as the most frequent value. The pore radii have their frequency maximum around 100 Å. High macroporosities were observed in the «Gansinger-Dolomit» and in the «Dolomit der Anhydritgruppe».

Strain measurements on samples from the «Opalinus-Ton» gave linear dilatation coefficients around 10^{-5} , both parallel and perpendicular to the bedding planes.

From 15 Jurassic and Triassic core samples polished sections of Kerogen concentrates were prepared to determine by reflected light microscopy the maturity and the maceral composition. Most samples analysed contain hydrogen lean Kerogen with a low H/C-ratio. Only Kerogens of the «Posidonienschiefer» and of some very thin interbeds in dolomites of the «Anhydritgruppe» consist predominantly of algae and hence reveal enhanced H/C-ratios. Although there is considerable scatter in the depth-plot of the vitrinite reflectance values (partly measured directly, partly converted from measured spectral fluorescence parameters), a maturity gradient of 0,10% $R_m/100$ m was estimated for the total depth interval investigated. Based on its maceral composition, especially its enhanced liptinite content, the «Posidonienschiefer» was recognized as the only potential source bed in the sequence penetrated by this well. The organic matter of this rock has reached a maturity level equivalent to the onset of hydrocarbon generation.

These petrographical results were confirmed by the measurement of yield and composition of the low and high molecular weight hydrocarbons (C_2-C_7 and C_{15+} , respectively) extracted from clays of Lias and Dogger intervals. From the composition of the low molecular hydrocarbon fraction it could also be concluded that the uppermost 18,16 m of the «Opalinus-Ton» are influenced by weathering processes, a fact that was not evident from the mineralogical examination of this zone.

The borehole was logged over its total length with different geophysical tools. To this end electric, radiometric and acoustic methods as well as techniques for measuring formation temperature, borehole geometry and water inflow were employed.

The resistivity logs as well as the radiometric logs fully confirmed the lithological boundaries established by sedimentological core analysis. The gamma-ray log shows relatively high radiation values in glauconitic beds of the Upper Lias and in clays and clay marls of the Upper Keuper. The various values for rock densities, calculated from the gamma-gamma log, correspond generally well with values obtained from core samples in the laboratory. The curve characteristics of the neutron-gamma log are remarkably analogous to those of the resistivity log, both for the cased as well as the uncased borehole interval.

From the acoustic log exact velocities of longitudinal waves (p-waves) typical for different rocks could be determined. Down to a depth of 200 m only the transit time in the hard interval of the «Gansinger-Dolomit» gives values greater than 4000 m/sec. Below 200 m all acoustic velocities exceed 4000 m/sec except for the strongly porous «Trigonodus-Dolomit» and some fractured and brecciated layers in the upper part of the «Anhydritgruppe».

On the temperature logs a slow rise of the borehole temperature gradient from 0,04 °C/m to 0,07 °C/m was registered between 30 m and 130 m depth. In the probably undisturbed interval between 314 m and final depth at 321,8 m the gradient is 0,038 °C/m with a maximum temperature of 28,16 °C.

A combined interpretation of temperature, salinity, caliper and flowmeter logs made it possible to locate very accurately the points of groundwater entry in the well and to calculate the individual influx volumes. The enlarged hole diameters in the Muschelkalk at 230 m and 300 m depth correlate with observed water inflows from highly porous and partly brecciated dolomites.

The rock mechanical characteristics of the «Opalinus-Ton» were investigated both in situ and on core samples in the laboratory. On the strength of their mechanical properties, these argillaceous sediments are defined as rocks. The reference values determined by the experiments show a considerable spread but no sudden fluctuations and only an insignificant tendency to change

with increasing depth. This confirms the relatively homogeneous lithological and mineralogical structure of the penetrated 45,4 m of the formation.

With 9 in situ-measurements the moduli of deformation for the penetrated rocks were determined. From a depth of 38 m down to the bottom of the hole they gave rather uniform mean values. The considerably lower moduli at 26,5 m and 32,5 m are probably due in the first case to weathering and in the second case to a fractured zone of disturbance.

Characteristic of the investigated rocks are their low compressive strength and low shear strength, particularly parallel to the bedding planes, as well as their pronounced swelling tendency.

Below the productive groundwater stream in the Quaternary sands and gravels of the Aare valley the only other aquifers encountered in the borehole occur in the Triassic sequence. These aquifers are

- the slightly confined waters of the «Gansinger-Dolomit» (production 3 l/min with a small pump),
- the uppermost portion of the «Trigonodus-Dolomit» (outflow approx. 16,1 l/min),
- the «Trochitenkalk» (outflow 6,8 l/min) and
- the «Dolomit der Anhydritgruppe» (outflow 10,4 l/min).

All the waters in the Muschelkalk are confined, with overpressures reaching to approx. 15 m above ground-level. At the surface the total outflow from the Muschelkalk amounted to approx. 33,3 l/min, with an average temperature of 22–23 °C.

The water from the «Gansinger-Dolomit» has a total mineralization of 14683 mg/l. It is characterized as a subthermal water (approx. 17,6 °C) containing Na, Ca, Mg, SO₄, Cl and, as minor constituents, Li, F, I, Fe and Br. In contrast, the thermal waters from the Muschelkalk show a considerably lower mineralization (6124 to 6951 mg/l). They are chemically very similar among themselves, containing Na, Ca, Mg and SO₄ with Li, Fe, F and Br as minor constituents and compare thus rather well with the thermal waters of Baden. The gases dissolved in the waters from the Muschelkalk show a relatively high percentage of helium. This inert gas presumably originates from the crystalline rocks of the basement.

On 6 groundwater samples several isotope analyses have been carried out. In order to arrive at a significant and meaningful interpretation of the obtained data, these measurements need to be placed in a wider regional context. This will be possible once the isotope determinations from the deep boreholes of the Nagra drilling programme in northern Switzerland and from outflows of mineral and thermal waters analysed within the framework of Nagra's regional hydrogeological investigations become available. As a preliminary, and in many respects still tentative result, residence times of several thousand years are indicated for the water of the «Gansinger-Dolomit». For the waters of the Muschelkalk the residence time, according to the ³⁹Ar-result, is more than 1000 years, according to the ¹⁴C-result probably more than 20000 years. No significant admixture of recent fresh water could be deduced from the ³H- and ⁸⁵Kr-determinations.

1. Einleitung

1.1 Allgemeines

Zur Überprüfung der Erdbebensicherheit der Kernkraftwerke Beznau I und Beznau II und der Fundationsverhältnisse für das neue Wehr in der Aare liessen die Nordostschweizerischen Kraftwerke AG (NOK) im Winter 1979/80 auf der Beznauinsel neben einigen untiefen Bohrungen eine Kernbohrung von 321,8 m Tiefe ausführen. Diese als Nr. 7904, Beznau bezeichnete Bohrung der NOK reicht vom mittleren Opalinus-Ton lückenlos bis in die Oberen Sulfatschichten der «Anhydritgruppe» des Muschelkalks. Da sie für das Untersuchungsprogramm der Nagra in der Nordschweiz wichtige Erkenntnisse versprach, wurde sie in möglichst umfassender Weise wissenschaftlich ausgewertet.

Die vorliegende Lieferung der Geotechnischen Serie ist die erdwissenschaftliche Dokumentation dieser vielfältigen Untersuchungen. Die Nagra dankt der Schweizerischen Geotechnischen Kommission für das Einverständnis, diese Arbeit ebenfalls in der Reihe «Nagra Technische Berichte» erscheinen zu lassen.

Folgende Institutionen und Unternehmungen waren an den Arbeiten beteiligt:

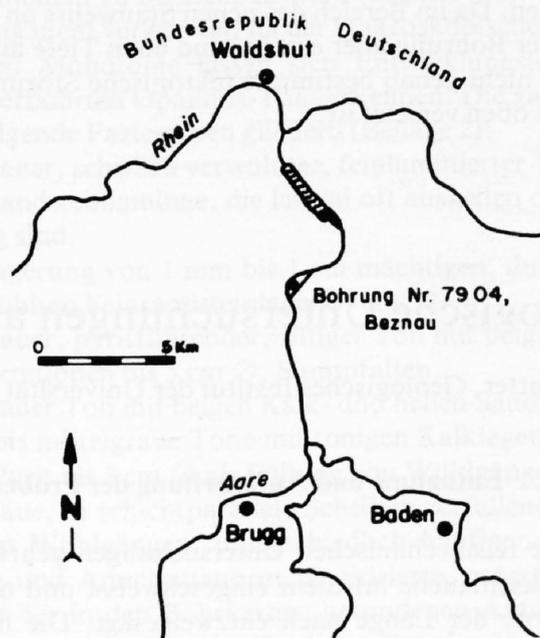
- Bauherrschaft und technische Bauleitung:
Nordostschweizerische Kraftwerke AG, Baden
- Geologische Bauleitung und hydrogeologische Untersuchungen:
Geologisches Büro Dr. Heinrich Jäckli, Zürich
- Bohrfirma:
Swissboring AG, Schwerzenbach
- Geophysikalische Bohrlochmessungen:
Prakla-Seismos GmbH, Hannover
- Dilatometersversuche im Bohrloch:
Solexperts AG, Schwerzenbach
- Abpressversuche im Bohrloch:
Swissboring AG, Schwerzenbach
- Geotechnische Untersuchungen an Opalinus-Ton:
Terrexpert AG, Bern
- Sedimentologische, mineralogische und anorganisch-geochemische Untersuchungen an Bohrkernen:
Geologisches Institut der Universität Bern
Mineralogisch-petrographisches Institut der Universität Bern
- Quecksilber-Druckporosimetrie:
Mineralogisch-petrographisches Institut der Universität Fribourg
- Wärmeleitfähigkeitsbestimmungen:
Institut für Geophysik der ETH Zürich
- Bestimmung des Kationenaustauschvermögens:
Forschungslabor der Zürcher Ziegeleien, Zürich
- Radiometrische Bestimmungen:
Institut für Geophysik der ETH Zürich
- Genese von Kohlenwasserstoffen in Lias- und Doggersedimenten:
Institut für Erdöl und Organische Geochemie, (ICH-5), KFA Jülich GmbH, Jülich
- Art und Reife des organischen Materials in mesozoischen Sedimenten:
Institut für Erdöl und Organische Geochemie, (ICH-5), KFA Jülich GmbH, Jülich

- Chemische Wasseranalysen:
Institut Bachema AG, Zürich
Institut Fresenius, Wiesbaden
- Isotopenanalysen für Altersbestimmungen:
Physikalisches Institut der Universität Bern, Abteilung Low Level
Counting und Nukleare Geophysik
- Gasanalysen:
Eidg. Institut für Reaktorforschung (EIR), Würenlingen

Die Redaktion der technischen und wissenschaftlichen Einzelberichte und ihre Zusammenfassung zur vorliegenden Publikation besorgte Dr. R. H. Beck, beratender Geologe, Kehrsatz.

1.2 Lage der Bohrung

Die Kernbohrung Nr. 7904 liegt auf der Insel Beznau (Gemeinde Döttingen, Kanton Aargau) zwischen dem Oberwasserkanal und dem Aareknie, nordöstlich des Kernkraftwerks Beznau II auf Koordinaten 659491/267242 mit einer Terrainkote von 325,8 m.



Figur 1: Lage der Kernbohrung Nr. 7904, Beznau.

1.3 Bohrmethode und Bohrdurchmesser

- Rotationskernbohrung im Lockergestein mit \varnothing 206, 180 und 145 mm bis 24,00 m.
- Rotationskernbohrung \varnothing 101 mm, mit Doppelkernrohr HQ, bis 131,15 m.
- Rotations-Seilkernbohrung \varnothing 96 mm, mit Doppelkernrohr HQ, bis 203,00 m.
- Rotations-Seilkernbohrung \varnothing 76 mm, mit Doppelkernrohr NQ, bis 321,80 m Endteufe.

Die Bohrung ist bis 203 m mittels Stahlrohr HQ, Aussen- \varnothing 89 mm, Innen- \varnothing 78 mm, verrohrt; darunter steht die Bohrung unverrohrt.

2. Geologischer Überblick

Die im Gebiet des ruhig gelagerten Tafeljuras liegende Kernbohrung durchfuhr folgende fast horizontalen Schichten:

- 0 – 8,4 m Niederterrassenschotter
- 8,4– 20,3 m Moräne
- 20,3– 65,7 m Opalinus-Ton (oberes Toarcien-Aalenien)
- 65,7– 98,4 m Lias
- 98,4–216,3 m Keuper (obere Trias)
- 216,3–291,4 m oberer Muschelkalk (mittlere Trias)
- 291,4–321,8 m mittlerer Muschelkalk (mittlere Trias)

Die Kernbohrung wurde auf einer Teufe von 321,8 m in den Oberen Sulfatschichten der «Anhydritgruppe» des mittleren Muschelkalks abgebrochen. Anhand der kontinuierlich gezogenen Bohrkern wurde auf der Bohrstelle ein lithologisches Profil 1:100 aufgenommen, welches als Grundlage für das in Beilage 1 zusammengefasste Bohrprofil diente.

In den Bohrkernen waren keine Anzeichen von grösseren tektonischen Störungen oder verstärkter Klüftung zu erkennen. Da im Bereich des neuen Stauwehrs an der Aare der Lias im Flussbett aufgeschlossen ist, in der Bohrung aber erst in rund 66 m Tiefe angetroffen wurde, muss dazwischen eine in ihrer Lage nicht genau bestimmte tektonische Störung verlaufen, längs welcher der Lias des Stauwehrs nach oben versetzt ist.

Literatur: BADER (1925)

3. Sedimentologische Untersuchungen an Bohrkernen

(A. Matter, Geologisches Institut der Universität Bern)

3.1 Entnahme und Aufarbeitung der Proben

Sämtliche nicht für die felsmechanischen Untersuchungen gebrauchten Bohrkern wurden auf der Bohrstelle in Plastikschläuche luftdicht eingeschweisst und nach Bern transportiert. Im Labor wurden die Bohrkern der Länge nach entzweigesägt. Die lithologische Aufnahme im Massstab 1:100 erfolgte an den Archivhälften, welche anschliessend fotografiert und wieder in vakuumierte Plastikschläuche eingeschweisst wurden. Die Proben für sämtliche Analysen wurden ausschliesslich der Arbeitshälfte der Bohrkern entnommen. Die Gesteinsansprache erfolgte nach dem Grunddiagramm von FÜCHTBAUER (1959). Als Vorlage zu Legende und Symbolen diente, soweit möglich, die SHELL Standard Legend (1976). Die Gips- und Anhydritgesteine wurden nach MAIKLEM et al. (1969) klassifiziert. Auf Fototafel 1 sind die wichtigsten in der Bohrung auftretenden Gips- bzw. Anhydritstrukturen abgebildet.

3.2 Profilbeschreibung

Ein lithologisches Detailprofil 1:250 mit einer Kurzbeschreibung der einzelnen Schichtglieder gibt Beilage 2. Auf Beilage 3 sind die lithologischen Verhältnisse mit mineralogischen, petrophysikalischen und geochemischen Daten korreliert.

3.2.1 *Opalinus-Ton*

20,3–65,7 m, oberes Torcien-Aalenien

Von der im Raum Beznau etwa 100 m mächtigen Serie des Opalinus-Tons fehlt in der Bohrung infolge Erosion die obere Hälfte. Untersucht wurden die Bohrkerne ab 24,00 m, da die obersten 3,7 m unter den quartären Ablagerungen weitgehend verwittert sind.

Generell besteht der Opalinus-Ton aus einer relativ monotonen Abfolge dunkel- und mittelgrauer, feinlaminiertes, oft biogen verwühlter, karbonatarmer, glimmerreicher Tone und siltiger Tone (Beilage 2). Der Karbonatgehalt liegt meistens zwischen 8 und 12% und erreicht selten höhere (bis 20%) oder niedrigere Werte (5%) (Beilage 3). Auf den Schichtflächen sind die feinen Hellglimmerblättchen makroskopisch deutlich erkennbar.

Im Dünnschliff beobachtet man in laminiertem Opalinus-Ton eine deutliche Parelleltextur, welche durch die erwähnten Muskowitblättchen (bis 250 μ) und die übrigen Tonmineralien, die \pm in die Schichtung eingeregelt sind, hervorgerufen wird.

Daneben sind eckige Quarz- und untergeordnet Feldspatkörner (max. meist um 50 μ), mikritische Karbonatpartikel und seltener Fossilbruchstücke und Glaukonit vorhanden. Feinkörniger Pyrit und andere, nicht näher bestimmte Fe-Erze sind häufig, quantitativ jedoch unbedeutend. Pyritkonkretionen bis 5 cm Durchmesser kommen ebenfalls vor (s. u.). Ein hoher Anteil der Tonmineralien liegt nach Dünnschliffbeobachtungen zwischen 20 und 2 μ , so dass der Opalinus-Ton eigentlich oft als toniger Siltstein zu bezeichnen wäre (Kapitel 3.3). In den Beilagen 2, 3 und im Text wird diese Bezeichnung nicht verwendet, da der makroskopische Eindruck der eines Tons ist.

Trotz der scheinbaren Monotonie lassen sich Entwicklungstendenzen und verschiedene Faziestypen innerhalb des erbohrten Opalinus-Tons erkennen. Die ganze Serie wurde gegen unten toniger und lässt sich in folgende Faziestypen gliedern (Beilage 2):

- 20,20–28,50 m Dunkelgrauer, schwach verwühlter, feinlaminiertes Ton mit hellen, 1–5 mm dünnen Feinsandsteinlaminae, die lateral oft auskeilen oder infolge Verwühlung linsenförmig sind.
- 28,50–34,93 m Wechsellagerung von 1 mm bis 1 cm mächtigen, dunkelgrauen, kalkigen Tonen und verwühlten Feinsandsteinlagen.
- 34,93–43,15 m Dunkelgrauer, pyritführender, siltiger Ton mit beigen, kalkigen Zwischenlagen. Pyritkonkretionen bis 5 cm \varnothing , Slumpfalten.
- 43,15–46,34 m Dunkelgrauer Ton mit beigen Kalk- und hellen Sandsteinlagen
- 46,34–53,34 m Dunkel- bis mittelgraue Tone mit tonigen Kalklagen. Feinverteilter und konkretionärer Pyrit bis 3 cm \varnothing als Füllung von Wühlgängen.
- 53,34–65,70 m Dunkelgraue, in schichtparallele Scheiben zerfallende Tone mit fadenförmigen, oxydierten Wühlgängen, unterschiedlich häufigen Müschelchen (*?Posidonia*), Aptychen und Ammonitenbrut. Pyritisierte, grössere Wühlgänge bis 2 cm \varnothing . Aufgrund der in den Bohrkerne gefundenen Ammoniten (*Pleydellia sp.*) sind diese untersten Schichten des Opalinus-Tons ins obere Toarcien zu stellen.

In verschiedenen Niveaus des Opalinus-Tones treten meist steile, zum Teil calcitisierte Klüfte und Brüche mit unbedeutendem Versatz auf (Beilage 2).

3.2.2 *Jurensis-Mergel*

65,70–69,13 m, oberes Toarcien

Mittelgraue, harte Kalkmergel mit teilweise diffus, teilweise scharf begrenzten 5–10 cm mächtigen Kalkknauern. Diese werden gegen oben kleiner und weniger häufig, so dass sich die obersten Jurensis-Mergel nur durch etwas hellere Farbe und höheren Kalkgehalt von den hängenden Pleydellenschichten unterscheiden. Viele dünnschalige Müschelchen (*?Posidonia*), vereinzelte dicke Belemniten und pflasterartige Ansammlungen von Belemniten sowie mit Mikrit gefüllte Pleydellien wurden beobachtet.

Die Mächtigkeit der Jurensis-Mergel beträgt 3,43 m.

3.2.3 Posidonienschiefer

69,13–75,06 m, unteres Toarcien

Sie werden von harten, etwas schiefrigen, kalkigen Tonen bis Kalkmergeln mit mehr oder weniger posidonienreichen Lagen gebildet. Die obersten 80 cm sind ähnlich wie die Jurensis-Mergel ausgebildet, jedoch ohne die Kalknauer. Sie enthalten phosphoritisierte Zahnreste und den Zonenammoniten *Dactylioceras ?commune*.

Die Hauptmasse der Posidionenschiefer besteht aus dunkelgrauen, feinlaminierten, bituminösen Tonmergeln sowie einer Wechsellagerung von bituminösen, kalkigen Tonen und laminierten Kalkmergeln.

Die untersten 1,02 m enthalten zwei Stinkkalkbänke, die nach BRÄNDLIN (1911) eine weite Verbreitung haben. Zwischengeschaltet sind bräunliche, bituminöse, laminierte, kalkige Tone. Feinverteilter Pyrit, einzelne Pyritkonkretionen bis 2 cm Ø und ein hoher organischer Gehalt (max. 9,13% org. C) sind weitere typische Merkmale der Posidonienschiefer (Beilage 3).

Die Mächtigkeit der Posidonienschiefer beträgt 5,93 m.

3.2.4 Amaltheenschichten und Numismalis-Schichten

75,06–77,25 m, mittlerer Lias

Die Schichten des mittleren Lias sind gekennzeichnet durch dunkelgraue, schlierige, glaukonitführende Echinodermen-Lamellibranchier-Mikrite mit grossen Belemniten und dickschaligen Muscheln sowie angebohrten phosphorisierten und pyritisierten Kalkkonkretionen. Dies und das Auftreten von Bohrgängen und Hartgrundkrusten, teilweise an der Unterseite der Knollen, lässt den Schluss zu, dass es sich um exhumierte Konkretionen handelt, die bei Nicht-Sedimentation angebohrt, mit einer Phosphoritkruste imprägniert und durch Strömungen gerollt wurden. Mindestens zwei phosphoritisierte Hartgründe im oberen Teil dieser Serie (Beilagen 2 und 3) sind weitere deutliche Beweise für die Lückenhaftigkeit der Schichtfolge des mittleren Lias. Ein stark glaukonitisches Belemnitenpflaster bei 75,9–76,0 m macht sich mit einer hohen Strahlungsintensität im Gamma-Log bemerkbar.

Im Bohrprofil werden die Schichtglieder des mittleren Lias zusammengefasst, da die typischen Ammoniten im Bohrkern nicht gefunden werden. Nach bisherigen Kenntnissen und entgegen BRÄNDLIN (1911) scheinen jedoch die Obliqua-Schichten in diesem Teil des Tafeljuras nicht ausgebildet zu sein.

Die Mächtigkeit des mittleren Lias beträgt 2,19 m.

3.2.5 Obtusus-Tone

77,25–90,91 m, unterer Lias

Sie bilden eine 13,66 m mächtige Abfolge harter, toniger Siltsteine mit dünnen, unregelmässigen, da verwühlten Feinsandsteinschichten. Letztere sind oft nur noch als Füllungen von Wühlgängen erhalten, die als linsenförmige Querschnitte erkennbar sind. Helle Muskowitblättchen sind auf den Schichtflächen angereichert. Pyrit tritt feinverteilt im Gestein und als Konkretionen bis 2 cm Ø auf. Das Intervall 80,25–81,10 m besteht aus einem harten, ankeritischen Grobsiltstein.

Die Obtusus-Tone sind sehr fossilarm; vereinzelt wurden kleine Muschelschalen beobachtet. Die Obtusus-Tone sind stets mehr oder weniger stark verwühlt, nur die untersten 75 cm sind ungestört laminiert.

Im Dünnschliff (77,58 m) erkennt man 50% eckige Quarzkörner und ca. 10% Feldspäte in einer tonigen Matrix. Die Körner sind im Durchschnitt um 0,04 mm gross. Helliglimmer und die selteneren Biotitblättchen sind in den unverwühlten Partien schichtparallel eingeregelt. Pyrit tritt feinverteilt und in Wühlgänge füllenden Aggregaten auf. Karbonate ($\leq 10\%$) kommen als rekristallisierte, sparitische Flecken, Mikritpartikel und als Ankerithomboeder vor.

3.2.6 Arietenkalk und Angulatenschichten

90,91–92,05 m, unterer Lias

Zuoberst findet sich ein 40 cm mächtiger zuerst dunkler, toniger, gegen unten heller und weniger toniger Biomikrit mit dickwandigen Muscheln. Darunter folgt eine 8 cm mächtige Eisenoolithschicht, die einem Hartgrund aufruht. Der Fe-Oolith enthält neben den Fe-Ooiden bis 1 cm grosse Mikritgerölle mit limonitischer und phosphoritisierter Randzone und Bioklaste (Echinodermen, Lamellibranchier, untergeordnet *Involutina liassica* und ander Foraminiferen, Turmschnecken und Bryozoen). Der Hartgrund bildet die Oberfläche eines 12 cm mächtigen Lamellibranchier-Mikrits.

Der untere Teil dieser Schichtfolge besteht aus 35 cm schwarzen, feingeschichteten Tonen mit ?Cardien und zuunterst 20 cm aus pyritführendem Biomikrit. Es ist möglich, dass dieser Teil zur Abfolge der Angulatenschichten gehört (ERNI 1910; BRÄNDLIN 1911; BRAUN 1920).

Arietenkalk und Angulatenschichten sind zusammen 1,14 m mächtig.

3.2.7 Insektenmergel

92,05–98,43 m, unterer Lias

Der oberste Meter besteht aus feingeschichteten, schwarzen, bituminösen, kalkigen Tonen. Darunter folgen feingeschichtete Tone, die millimeterdünne bis 3 cm mächtige, oft gerippte Feinsandsteinlagen führen. Im oberen Teil dieser Tone finden sich zwei Kalklagen. An der Basis der Insektenmergel tritt eine tonige Dolomitfeinbreccie auf.

Die Mächtigkeit der Insektenmergel beträgt 6,38 m.

3.2.8 Obere bunte Mergel

98,43–105,74 m, Keuper

Unter einem 42 cm mächtigen, teilweise brecciösen Dolomit folgen 6,89 m bröcklige Dolomit-Mergel. Sie sind entweder grün, rötlich oder bunt ausgebildet. An ihrer Basis findet sich eine 5 cm mächtige Lage mit Dolomitgeröllen bis 1 cm Ø.

Die Mächtigkeit der Oberen bunten Mergel beträgt 7,31 m.

3.2.9 Gansinger-Dolomit

105,74–109,90 m, Keuper

Der obere Teil des 4,15 m mächtigen Gansinger-Dolomits (bis 106,97 m) ist von unten nach oben eine Abfolge von laminiertem, stromatolithischem, beigem Dolomit zu leicht synsedimentär aufgebrochenem Dolomit, übergehend in eine beige Dolomitbreccie mit vorwiegend Mergelkomponenten. Den mittleren Teil bildet eine grobe, bimodale Dolomitbreccie, die viele grüne Mergelkomponenten bis 10 cm Ø enthält. Der basale Teil ist geschichtet und enthält Mergelkalklagen. Längliche Lösungsporen, die zum Teil mit Kristallen ausgekleidet sind, können im ganzen Gansinger-Dolomit beobachtet werden.

3.2.10 Untere bunte Mergel

109,90–114,65 m, Keuper

Vorwiegend weinrote, feste Tone, die untergeordnet rot und grün gefleckt sind. Die Tone sind massiv, oft mit undeutlichen Wühlgefügen, selten sind sie laminiert.

Der niedrige Karbonatgehalt (< 10%) ist auf Dolomit zurückzuführen (Beilage 3). Die Tone enthalten wenige knollige, dolomitische Lagen sowie vereinzelt 10–20 cm mächtige, hellgrünliche, leicht knollige bis laminierte, tonige Dolomite, die möglicherweise Caliche-Lagen (Paläoböden) darstellen.

Die Grenze zu liegenden Schilfsandstein wurde lithologisch mit dem Einsetzen der Sandsteinlagen gezogen. Genetisch betrachtet, gehören jedoch die Unteren bunten Mergel zur Schilfsandsteinsedimentation; sie dürften eine Schwemmebenen-Facies der Schilfsandsteine darstellen.

Die Mächtigkeit der unteren bunten Mergel beträgt 4,75 m.

3.2.11 *Schilfsandstein*

114,65–131,15 m, Keuper

Die Grenze zwischen Schilfsandstein und liegendem Gipskeuper wird von manchen Autoren, z. B. von GSELL 1968, mit dem Einsetzen der sandigen Lagen und dem Aufhören von Evaporitlagen gezogen. Demnach käme die Untergrenze an die Basis der massiven Sandsteinzone (125,90 m) zu liegen. Dies mag aus der Sicht des kartierenden Geologen eine praktische Grenze sein, doch konnte WURSTER (1964) in seiner umfassenden Arbeit über den Schilfsandstein Deutschlands zeigen, dass die Basis des Schilfsandsteins oft «innerhalb der liegenden Pelite» (WURSTER 1964, S. 43) liegt. Dies trifft nach den vorliegenden Untersuchungen auch auf die Bohrung Nr. 7904, Beznau, und ebenfalls auf die Tongrube Frick (PETERS 1964) zu.

Die Grenze liegt bei 131,15 m, an der Basis einer 5,25 m mächtigen Serie evaporitfreier, grünlichgrauer bis dunkelgrauer Dolomitmergel und zum Teil feingeschichteter dolomitischer Tonmergel. Die Ergebnisse der Tonmineral-Untersuchung bestätigen die Richtigkeit dieser Grenzziehung (Beilage 3).

In der Bohrung ist der Schilfsandstein dreigeteilt. Der obere, dünngeschichtete Teil besteht aus wenig mächtigen, fluviatilen «fining-upward»-Kleinzyklen (bis 40 cm) aus rippelkreuzgeschichtetem, grünlichgrauem Feinsandstein (unten) – laminiertem Feinsandstein/Siltstein –, braunrotem, siltigem Ton (oben). In den allerobersten Teilen des Schilfsandsteins sind diese Zyklen nicht mehr klar auszumachen.

Vom obersten Teil durch einen 50 cm mächtigen, braunroten Ton getrennt, folgt der mittlere Schilfsandstein, ein massiver, grünlichgrauer Fein- und Mittelsandstein, der von der oben erwähnten basalen Dolomitmergel-Serie unterlagert wird.

Der Schilfsandstein ist porös (Tabelle 1 und Beilage 3) und weist einen diagenetisch stark überprägten Mineralbestand auf (Fototafel 3, Bilder a–c). Die Sandsteine stellen die Rinnen-Facies und die Mergel die Stillwasser-Facies des Schilfsandstein-Deltas dar (WURSTER 1964).

Die Mächtigkeit des Schilfsandsteins beträgt 16,50 m. Sie ist somit etwas höher als in der Tongrube Frick (10,50 m, PETERS 1964). Die variablen Mächtigkeiten entsprechen dem fluviatildeltaischen Charakter dieser Abfolge.

3.2.12 *Gipskeuper*

131,15–216,31 m, Keuper

Obwohl mit Mergel und Gips bzw. Anhydrit nur drei Gesteinsarten vertreten sind, stellt der Gipskeuper infolge verschiedenartigster Ausbildung der Gips-/Anhydritgesteine und deren komplexer diagenetischer Geschichte eine texturell und strukturell äusserst variable, heterogene Formation dar.

Das vorherrschende evaporitische Lithotop des Gipskeupers ist Anhydrit. Die evaporitische Facies, die sich bis in die Lettenkohle erstreckt, liegt nur zuoberst und zuunterst als Gips vor (Beilage 3).

Dies lässt sich auch zuoberst in der «Anhydritgruppe» des mittleren Muschelkalks beobachten. Die «Vergipsung» des Anhydrits tritt also in der Grenzzone zu den ± porösen, wasserführenden Nebengesteinen auf. Die hohen Sulfatgehalte des in diesen Nebengesteinen zirkulierenden Wassers (JÄCKLI und RISSI 1981) sind wahrscheinlich auf teilweise Auflösung des Gipses zurückzuführen.

Aufgrund der sedimentologischen Untersuchungen lässt sich der Gipskeuper trotz seiner Komplexität in folgende Untereinheiten gliedern, deren Grenzen zum Teil fließend sind:

Tone mit Gips (131,15–140,12 m)

Die obere Hälfte dieser Serie besteht vorwiegend aus dunkelgrauen Tönen mit einzelnen lachsroten Gipsknollen und relativ wenigen Kluffüllungen von lachsrotem und selten weissem Fasergips.

Die untere Hälfte ist eine heterogene Serie von gipsarmem rotbraunem Ton, schwarzbraunem Ton mit vereinzelt lachsroten Gipsknollen und bis 1,5 cm breiten lachsroten und dünnen weissen Fasergipsklüften, hellgrauen Tönen mit ca. 50% Gips in knolligeschichteter Facies sowie vielen lachsroten und weissen Fasergipsklüften. Die sich kreuzenden steilen Klüfte durchlagern den Ton kreuz und quer und finden sich auch schichtparallel eingelagert. In dieser Serie eingeschaltet, treten einige 20–40 cm mächtige grünliche, tonige Dolomite auf.

Im Dünnschliff erkennt man, dass die lachsroten Knollen weitgehend aus einem filzigen Gipsgefüge bestehen. Häufig sind die Knollen jedoch bis 50% silifiziert, wobei im verdrängenden Quarz Reste von Anhydritkristallen zu erkennen sind. Dieselbe Erscheinung tritt auch, allerdings weniger ausgeprägt, in den lachsroten Fasergipsklüften auf; sie fehlt im weissen Fasergips.

Tone mit Anhydrit-Gips-Übergang (140,12–146,35 m)

Dunkelgraue und grünlichschwarze, seltener rotbraune Tone, die infolge vieler kleinster (ca. 1 mm Ø) bis mehrere cm grosser, deformierter Anhydritknöllchen und zahlreicher sich kreuzender steiler und schichtparallel verlaufender Klüfte zerschert erscheinen. Die Klüfte sind zum Teil mit rötlichem Anhydrit und zum Teil mit weissem Fasergips verheilt. Daneben treten einzelne, 5–20 cm mächtige Lagen von geschichtet-knolligem und Mosaik-Anhydrit (= «chicken-wire»-Anhydrit) auf. Bei 141,50 m ist eine ca. 5 cm breite und 50 cm hohe mit lachsrotem Anhydrit gefüllte Kluft vorhanden. Die teilweise silifizierten Anhydritknollen und die Klüfte sind vom Rande her und von Scherflächen aus durch bräunlichrosa Fasergips ersetzt bzw. ± vollständig durch filziges Gipsgefüge verdrängt.

Der mittlere Sulfatgesteinsanteil dieser Abfolge liegt zwischen 40 und 50%, wobei das Anhydrit-/Gips-Verhältnis grosse Schwankungen zeigt. Gegen das Liegende hin nimmt jedoch der Anhydrit zu (Beilage 3).

Tone mit Anhydritschichten (146,35–156,40 m)

Vorwiegend grauschwarze und grünlichgraue, seltener rotbraune Tone, im oberen Teil mit vielen 20–30 cm mächtigen Lagen von Mosaik-Anhydrit und knolligem Anhydrit. Im unteren Teil sind die Anhydritschichten weniger mächtig (1–15 cm) und seltener. Anhydritklüfte sind selten.

Der mittlere Evaporitanteil dieser Serie beträgt etwa 20–30%, davon ist < 2% Gips.

Heterogene Serie (156,40–175,23 m)

Sie setzt sich zusammen aus:

- 44% 10–60 cm mächtigen matrixfreien Anhydritlagen, die entweder als Mosaik-Anhydrit oder als geschichteter Anhydrit mit mm- bis cm-Bereich liegender Anhydrit/Ton-Wechselagerung ausgebildet sind.
- 40% Anhydritlagen (knolliges Mosaik und geschichtet-knolliger Typ) von 10–15 cm Mächtigkeit, die durch dünne schwarze Tonlagen getrennt sind.
- 16% schwarzen, zum Teil dolomitischen Tönen, die deformierte, meist rosafarbige Anhydritknollen und viele steile mit rosafarbigem, faserigem Anhydrit und einige mit schichtparallelem weissem Fasergips verheilte Klüfte enthalten.

Zyklische Serie (175,23–204,35 m)

Diese annähernd 30 m mächtige Serie weist zuoberst und im tieferen Teil je eine 5 m mächtige zyklisch aufgebaute Abfolge auf. Die 70–90 cm mächtigen Zyklen manifestieren sich durch Zunahme des Tonanteils, verbunden mit gleichzeitiger Abnahme des Anhydrits gegen das Hangende zu. Die Basis des Zyklus ist stets ein knolliger Mosaik-Anhydrit. Die übrigen 20 m der Serie

bestehen ebenfalls aus einer Wechsellagerung von geschichtetem Anhydrit mit rotbraunen bis schwarzen Tonen; ein zyklischer Aspekt ist nicht offensichtlich.

Massiver Anhydrit (204,35–212,35 m)

Im unteren Teil des Gipskeupers tritt massiver Anhydrit auf, der vorwiegend aus geschichtetem grauem Anhydrit (Fototafel 1, Bild f) besteht. Eingeschaltet finden sich im oberen Teil noch vereinzelt bis 70 cm mächtige Tonlagen mit Anhydritknollen.

Dolomit-Gips-Wechsellagerung 212,35–216,31)

Die 4 m mächtige basale Serie des Gipskeupers besteht von oben nach unten aus grauschwarzen, laminierten, dolomitischen Tonmergeln mit Anhydritknollen, anhydritischer Dolomitreccie, geschichtet-massivem grauem Anhydrit und einer 2 m mächtigen Wechsellagerung von bis 30 cm mächtigen Dolomit- und grauen Anhydritbreccien mit bräunlichem bis weissem Fasergips. Die Brekzierung erfolgte eindeutig spät-diagenetisch. Die Anhydritkomponenten von mm- bis ≥ 10 cm \varnothing sind unterschiedlich stark zu Gips umgewandelt. Wir nehmen an, dass diese Schicht der von Geländeaufschlüssen beschriebenen grobkavernösen Rauhwackenbank entspricht, mit der MERKI (1961) den Grenzdolomit gegenüber dem Gipskeuper abgrenzt. Jedoch rechnet MERKI (1961) diese Bank noch zum Grenzdolomit.

Die Mächtigkeit des Gipskeuper beträgt 85,16 m.

Literatur zu den Kapiteln 3.2.8 bis 3.2.12: PRASAD (1974)

3.2.13 *Lettenkohle*

216,31–220,35 m, oberer Muschelkalk

Gute Aufschlüsse von Lettenkohle sind im Schweizer Jura selten (GSELL 1968), vor allem sind die Obergrenze und der Übergang zum Gipskeuper nie vollständig aufgeschlossen. Die Bohrung Nr. 7904, Beznau, erschliesst deshalb neben einem vollständigen Gipskeuperprofil auch ein vollständiges Lettenkohlenprofil des Juras.

Während in Deutschland die Lettenkohle seit jeher dem unteren Keuper («Lettenkeuper») zugerechnet worden ist, wurde sie in Frankreich und teilweise in der Schweiz in den Muschelkalk gestellt. Diese Diskrepanz kann nach WURSTER (1968) zwanglos durch einen von N her übergreifenden Delta-Komplex erklärt werden.

Die Lettenkohle bildet zweifelsohne das Bindeglied zwischen der vollmarinen Karbonatfolge des oberen Muschelkalks und dem hangenden kontinentalen tonigen und evaporitischen Gipskeuper. Sowohl lithofaziell (Kalke, frühdiagenetische Dolomite) wie von der Fauna her (Estherien, Fischschuppen usw.) überwiegen in der Lettenkohle des süddeutschen Raumes (BRUNNER 1973, ULRICH 1982), des Elsass (DURINGER 1982) und des Schweizer Juras die marinen Einflüsse über die ebenfalls festgestellten brackischen, limnischen und kontinentalen Bedingungen, so dass wir die Lettenkohle dem Muschelkalk zurechnen. Eine biostratigraphisch eindeutige Zuordnung müsste wegen Fehlens von Leitfossilien palynologisch versucht werden.

Die Lettenkohle wird vom Grenzdolomit und den Estherienschiefern aufgebaut, die sich faziell verzahnen. Der Grenzdolomit besteht aus einem oberen 70 cm mächtigen beige-grauen Dolomikrit und einem unteren 2,60 m mächtigen grau-beigen Dolomikrit, getrennt durch eine kalifeldspatreiche Tonlage vom Typ der Estherienschiefer. Der obere Dolomit enthält feine, mit 60° einfallende Klüfte, die mit mittelblockigem, Reste von Anhydrit und authigenem Kaolinit enthaltendem Gips gefüllt sind.

Der untere Dolomikrit ist porös mit sekundären Makroporen und Drusen. Die mit Kaolinit gefüllten Makroporen, pseudomorph nach Anhydrit, weisen bis zu 5 mm \varnothing auf; die Drusen erreichen Durchmesser bis zu 7 mm und sind mit ehedralen Calcitkristallen und etwas Pyrit ausgekleidet.

Die Estherienschiefer sind 70 cm mächtige beige-graue laminierte siltige Tone, die stellenweise feinkörnigen Pflanzenhäcksel und kalifeldspatreiche Lagen sowie Laminae reich an Fischschuppen und -zähnen enthalten.

Die Mächtigkeit der Lettenkohle beträgt 4,04 m.

3.2.14 *Trigonodus-Dolomit*

220,35–254,85 m, oberer Muschelkalk

Die Grenze zwischen *Trigonodus-Dolomit* und der Lettenkohle ist im Bohrkern eindeutig erkennbar, obschon kein Bonebed an der Basis der Lettenkohle gefunden wurde. Allerdings konnten im obersten Meter des Dolomits zahlreiche, jedoch nicht an eine Lage gebundene Schuppen- und Knochenreste beobachtet werden.

Den Abschluss des *Trigonodus-Dolomits* bildet ein 2,7 m mächtiger beiger, porös-zuckerkörniger Dolomit mit bioklastischen Dolomitlagen und den erwähnten Knochenresten. Der Biodetritus liegt als offene Poren vor. Darunter folgt ein knapp 1 m mächtiger, vollständig dolomitisiert, poröser Oolith, der von porösem beigem Dolomit (1 m) mit grauen Silexlagen unterlagert wird. Dieser Horizont mit Hornstein ist nach MERKI (1961) fast im ganzen Schweizer Jura verbreitet.

Unter den obersten Schichten des *Trigonodus-Dolomits* liegt ein 9,60 m mächtiger stark poröser Dolomit mit zahlreichen 5–30 cm mächtigen bioklastischen Lagen. Die vielen Makrofos-silen sind vorwiegend auf den mittleren Teil der Abfolge beschränkt und liegen als Hohlformen vor. Dieser Abschnitt dürfte den Kaistener Schichten von MERKI (1961) entsprechen. Mit Calcit und seltener mit Quarz ausgekleidete, oft mit weissem Kaolinit gefüllte Drusen nehmen gegen unten an Zahl und Grösse von 5 mm auf 2 cm zu. Kaolinit tritt auch als Kluftbelag auf. Stylolithen mit schwarzen, pyritreichen dolomitischen Tonsäumen sind ebenfalls häufig.

Im Liegenden dieser Serie tritt eine 15 m mächtige dickgebankte Abfolge von strukturlosem, grauem, feinkristallinem Dolomit auf, mit 5–15 cm mächtigen grobporösen Lagen, die sich im Abstand von etwa 1 m folgen. Die bis 3 cm \varnothing aufweisenden Drusen sind mit Calcit ausgekleidet. Im oberen Teil dieser Dolomite finden sich ausserdem zahlreiche bis 5 mm grosse Kaolinitknöllchen als Drusenfüllungen sowie silifizierete Fossilschalen und, pseudomorph nach Anhydritknöllchen, porphyroblastischer Quarz mit Anhydritresten.

Die basalen 5,30 m des *Trigonodus-Dolomits* sind dünnbankiger und bestehen in ihrer unteren Hälfte aus 5–15 cm mächtigen Schichtpaaren von beigem und grauem Dolomit, die zur Plattenkalk-Facies überleiten. In dieser Serie treten typische stark verwühlte Lagen auf, die einen fluidalen Aspekt zeigen («Gekrösestruktur» in Beilagen 2 und 3). Die Untergrenze des *Trigonodus-Dolomits* wurde nach MERKI (1961) beim Wechsel von der stark dolomitischen zur völlig dolomitischen Facies gelegt (Beilage 3).

Der *Trigonodus-Dolomit* zeichnet sich im allgemeinen durch eine hohe Mikroporosität (Interkristallporen) und Makroporosität (Drusen, gelöste Fossilschalen, offene Klüfte) aus. Die Klüfte sind in den unteren 10 m häufig.

Die Mächtigkeit des *Trigonodus-Dolomits* beträgt 34,50 m.

3.2.15 *Plattenkalk*

254,85–272,20 m, oberer Muschelkalk

Der obere Plattenkalk besteht aus einer nahezu 14 m mächtigen Folge von dünngebankten Kleinzyklen bzw. einer unregelmässigen Wechsellagerung von beigem Dolomit und grauem Mikrit oder dolomitischem Mikrit. Darin eingeschaltet finden sich 10 cm bis über 10 m mächtige Horizonte von dolomitischen Lamellibranchier-Biomikriten. Der Dolomit tritt meistens in Form von gleichmässig im Mikrit eingestreuten euhedralen Kristallen von 40–100 μ und als Verdrän-

gung von Partikeln sowie in Partikellösungsporen auf. In den obersten Metern wurden Kaolinitaggregate bis 0,25 mm Ø sowie Kaolinit auf Klüften beobachtet. Die Lamellibranchierschalen sind meistens durch «dissolution cavity-fill» ersetzt, wobei die Poren nur teilweise wieder eingefüllt wurden. Crinoiden-Biomikrite fehlen im oberen Plattenkalk völlig.

Der untere Plattenkalk besteht aus 3,45 m teilweise laminiertem beigem Lamellibranchier-Crinoiden-Biomikrit mit bis zu 1 cm langen Crinoidenbruchstücken und im dm-Bereich geschichteten beigem, z. T. dolomitischem Mikrit, der meistens verwühlt ist. Die vielen Stylolithe weisen schwarze Tonsäume auf. In den untersten 1,5 m treten in Wechsellagerung mit Biomikritlagen 20 cm mächtige schiefrige tonige Kalke auf, in deren Liegendem wir die Grenze zum Trochitenkalk legen.

MERKI (1961) legt die Untergrenze des Plattenkalks an die Basis eines Mergelhorizonts, der auch aus mehreren 5–30 cm mächtigen Mergelbändern bestehen kann. Er weist darauf hin, dass sich «lithologisch der untere Plattenkalk eng an den liegenden Trochitenkalk anschliesst» (MERKI 1961, S. 171). Deshalb ist die Grenzziehung zwischen Plattenkalk und Trochitenkalk bei fehlenden, oder wie in der Bohrung Nr. 7904, Beznau, äusserst geringmächtigen Mergellagen unsicher.

Die totale Mächtigkeit des Plattenkalks beträgt 17,35 m.

3.2.16 *Trochitenkalk*

272,20–291,40, oberer Muschelkalk

Nur die obersten 5,50 m dieser Schichtfolge sind in eigentlicher Trochitenkalk-Facies ausgebildet, mit bis 50 cm mächtigen Einschaltungen von dolomitischen Crinoidenkalkbänken in einer dickbankigen Serie von 5–10 cm mächtigen Zyklen aus grauem dolomitischem Mikrit (unten) und beigem dolomitischem Mikrit (oben). Darunter folgen 8,0 m verwühlte graue Mikrite mit vereinzelt Lagen mittelarenitischer Biosparite.

Zwischen 285,85 m und 287,85 m treten beige, kreidig-poröse Mikrite mit Lösungsporen nach Gipskristallen auf, die als Lithotop dem Dolomit der «Anhydritgruppe» ähnlich sind. In ihrem Liegenden findet sich der poröse Basalolith (MERKI 1961) mit weitgehend mikritisierten Ooiden, der seinerseits von 2 m mächtigen schlierigen, z. T. laminierten Kalken unterlagert wird.

Der Trochitenkalk erreicht eine Mächtigkeit von 19,20 m.

3.2.17 *Dolomit der «Anhydritgruppe»*

291,40–302,85, mittlerer Muschelkalk

Zwischen 294,74 und 296,24 m liegt ein 1,50 m mächtiger beiger, stromatolithisch-laminierter, sehr poröser Dolomit mit Gastropoden und zahlreichen bis zu 1 cm grossen Hornsteinknollen. Neben Trockenrissen weist diese Schichtlage auch Dolomitintraklasten und bis 3 mm grosse, pseudomorph nach Gipskristallen geformte Poren auf. Quarzpseudomorphosen nach Anhydritkristallen und -knöllchen sind in manchen Schliffen zu sehen. Nach MERKI (1961) ist dieser Horizont durchgehend verfolgbar.

Darüber liegen 3,35 m beige und graue stromatolithisch-laminierte poröse Dolomite mit zwei dolomitischen Kalkbänken voller diskusförmiger Lösungsporen von sekundärem Anhydrit (Foto-tafel 2, Bild c). Die Grenze des Dolomits der «Anhydritgruppe» zum Trochitenkalk legen wir jedoch hier über den Kalklagen mit der ersten Dolomitbank (Beilagen 3 und 4).

Im Liegenden des Horizonts mit den Hornsteinlagen folgen 6,60 m beige, feinkristalline, poröse Dolomite. Diese sind im oberen Teil noch häufig stromatolithisch ausgebildet mit Lagen von Rauhwanne und Breccien, vereinzelt Drusen, Klüften und Slumpfalten. Ferner treten kleine Anhydritknollen und dünne Lagen von geschichtetem Anhydrit auf, der häufig durch Quarz und/oder Dolomit verdrängt ist.

Der Dolomit der «Anhydritgruppe» ist 11,45 m mächtig.

3.2.18 Obere Sulfatschichten der «Anhydritgruppe»

302,85–321,80 m, mittlerer Muschelkalk

Von den etwa 45 m mächtigen Oberen Sulfatschichten wurden eine 9,40 m mächtige Mergelabfolge und darunter 9,55 m Anhydrit erbohrt.

Die Mergelabfolge besteht im oberen Teil aus olivgrauen, blättrigen, kalkig-dolomitischen Mergeln mit vereinzelt deformierten Anhydritknollen sowie feingeschichtetem Dolomit (Beilage 2). Dieser enthält Anhydritknollen und bis 1,5 cm breite, mit Fasergips gefüllte Klüfte und ist z. T. postsedimentär brekziert. Die rosa Hornsteinknollen an der Basis sind silifizierte Anhydritknollen.

Der untere Teil (Beilage 2) besteht aus einer Wechselfolge von 5–70 cm mächtigen dolomitischen Tonlagen, beigen, feingeschichteten, tonigen Dolomiten und 5 mm bis 5 cm starken Lagen von knolligem Anhydrit und Fasergips. Der Anhydrit liegt weitgehend als Gips vor (Beilage 3).

Die Bohrung erreichte ihre Endteufe in einer Abfolge aus dunkelgrauem im mm- bis cm-Bereich geschichteten massivem Anhydrit, durchsetzt mit mm-starken Tonfugen (Fototafel 1, Bild f) und grauem bis bräunlich-grauem, im 5-mm-Bereich geschichteten massivem und teilweise deformiertem Anhydrit.

3.3 Korngrößenanalyse der tonigen Sedimente

3.3.1 Methodik

Die Proben wurden vorsichtig von Hand im Mörser auf 2 mm zerkleinert und anschliessend mit 2n HCl im Wasserbad dekarbonatisiert. Durch mehrmaliges Zentrifugieren und Abdekantieren wurde die überschüssige Säure ausgewaschen. Zur weiteren Desaggregation wurde die Probe mit einem Dispergiermittel in einem mechanischen Rührwerk gerührt und darauf mit Beloran aufgekocht und mit Ultraschall behandelt. Zur Abtrennung des Sandanteils wurde die Probe danach durch ein 0,63-mm-Sieb gewaschen. Die Korngrößenanalyse einer eingewogenen Teilmenge der Feinfraktion erfolgte mit der Sedimentationswaage.

3.3.2 Ergebnisse der Korngrößenanalyse

Korngrößenanalysen von Ton- und Mergelsteinen geben keine sedimentologischen Aussagen, da sich Tonpartikel bei der Sedimentation normalerweise als flokkulierte Aggregate und nicht als Einzelteilchen absetzen. Auch ist es bei verfestigten Tonen meistens unmöglich, sie vollständig in ihre Mineralkörner bzw. -blättchen zu zerlegen. Trotzdem wurde der Versuch unternommen, da Korngrößenanalysen von Tonen für die Interpretation geotechnischer Parameter von Bedeutung sind.

Die mikroskopische Kontrolle des dispergierten Feinanteils zeigte, dass ein nicht unwesentlicher Teil noch als Aggregate vorlag, so dass die Analyse ein etwas zu grobkörniges Sediment vor täuscht. Vergleiche mit Dünschliffen ergaben, dass die als Grob- und Mittelsiltsteine bezeichneten Opalinus-Tonproben etwa um eine ganze Korngrößenklasse zu hoch eingestuft sind, d. h., Mittelsiltsteine sind eher Feinsiltsteine usw. Dies gilt auch für die Tonsteine der andern Schichtglieder. Die untersuchten Tonsteine sind somit teilweise Siltsteine und z. T. echte Tonsteine. Für den Opalinus-Ton wird dies durch die Daten von MADSEN (1976) bestätigt, der für die Fraktion $\leq 2\mu$ Anteile zwischen 37% und 63% angibt.

3.4 Porosimetrie

3.4.1 Gesteinsdichte und Korndichte

Diese Parameter lassen sich aus den für die Bestimmung der Porosität erforderlichen Messwerten ohne weiteren Aufwand errechnen. Die Messungen der Gesteinsdichte (Raumgewicht) wurden an 2,5–3,5 cm langen Bohrkernen von 3 cm \varnothing , welche für die Porositäts- und Permeabilitätsmessungen entnommen worden waren, durchgeführt. Die Gesteinsdichte der bei 110°C

getrockneten Probezylinder wurde durch Wägen in Luft und in Quecksilber ermittelt. Das spezifische Gewicht (Korndichte) wurde pyknometrisch an Gesteinspulvern bestimmt (MÜLLER 1964).

Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Der Opalinus-Ton weist Gesteinsdichten zwischen $2,32$ und $2,40 \text{ g cm}^{-3}$ auf, wobei keine eindeutige Tiefenabhängigkeit erkennbar ist. Einzig von $39,1$ bis $54,3$ m ist eine Abnahme der Dichte festzustellen, die mit der raschen Zunahme des Tongehalts zusammenhängen dürfte (Beilage 3). Relativ hohe Gesteinsdichten um $2,58 \text{ g cm}^{-3}$ weisen die Jurensis-Mergel ($65,70$ – $69,13$ m) und die Schichten des mittleren Lias ($75,06$ – $77,25$ m) auf, während die Posidonienschiefer ($69,13$ – $75,06$ m) durch niedrige Werte $2,10$ – $2,23 \text{ g cm}^{-3}$ hervorstechen. Die Obtusus-Tone ($77,25$ – $90,91$ m) weisen mit $2,40$ – $2,52 \text{ g cm}^{-3}$ ähnliche Werte wie der Opalinus-Ton auf. Die höchsten Werte über $2,90 \text{ g cm}^{-3}$ finden sich in den anhydritischen Gesteinen der Gipskeuper ($131,15$ – $212,35$ m) und der «Anhydritgruppe» ($302,85$ – $321,80$ m). Die gemessenen Korndichten schwanken je nach der Mineralzusammensetzung der Proben zwischen $2,38 \text{ g cm}^{-3}$ und $3,02 \text{ g cm}^{-3}$.

3.4.2 Absolute Porosität

Die totale oder absolute Porosität

$$\Phi = \frac{V_p(\text{Porenvolumen})}{V_f(\text{Feststoffvolumen})} \times 100 (\%)$$

wurde durch Messungen des Gesamtvolumens im Quecksilber-Auftriebsverfahren und der pyknometrischen Bestimmung des Festvolumens ermittelt (MÜLLER 1964).

Die Resultate finden sich in Tabelle 1 und sind in Beilage 3 zusammen mit der druckporosimetrisch ermittelten offenen Makro- und Mikroporosität in Abhängigkeit von der Bohrlochtiefe dargestellt. Die verhältnismässig hohen Werte über 15% oberhalb $28,5$ m müssen eine Folge der Verwitterung sein. Ab $29,39$ m bis 65 m ist generell eine Zunahme der absoluten Porosität von $10,5\%$ auf $14,4\%$ zu erkennen. Gleichzeitig nimmt jedoch mit der grösseren Überlagerung die offene Makroporosität ab. Die Differenz zwischen offener Makro- und Mikroporosität und der absoluten Porosität entspricht dem nicht kommunizierenden Porenraum. Dieser nimmt in Opalinus-Ton mit der Tiefe, d. h. mit zunehmendem Tongehalt, ebenfalls zu.

Hohe Porositäten bis 24% treten im Schilfsandstein auf. Dessen Poren sind nur teilweise mit authigenem Kaolinit, haarförmigem Illit, Feldspat und Quarz gefüllt. Kaolinit kommt sowohl in Form einzelner idiomorpher Blättchen wie auch als «buchförmige» Aggregate vor (Fototafel 3).

Wegen seiner tonig-*evaporitischen* Facies wurden im Gipskeuper sehr niedrige absolute Porositäten gemessen (Tabelle 1). Obschon er über weite Strecken von Klüften zerschert ist, sind diese durch Anhydrit bzw. Gips stets dicht verheilt.

Hohe Porositäten kennzeichnen sodann einzelne Horizonte bzw. Profilabschnitte der Kalke und Dolomite des Muschelkalks. Da die im Bohrloch durchgeführten Abpressversuche zuverlässige Aussagen über das hydrogeologische Verhalten dieser Gesteine erlauben, wurde auf Porositätsmessungen am Bohrkern verzichtet. Hingegen erschien eine phänomenologische Charakterisierung der vornehmlich sekundären Porosität, die oft ein beträchtliches Ausmass annimmt, sinnvoll. Die sekundären «Poren» umfassen einen breiten Grössenbereich. Er reicht einerseits von mehreren dm langen und 1 – 2 cm weiten offenen Klüften bis zu Drusen von max. mehreren cm \varnothing und andererseits von Lösungsporen von Fossilschalen (Partikellösungsporen) und Gips- bzw. Anhydritknöllchen bis zu mikroskopisch kleinen Lösungsporen nach Gips- bzw. Anhydritkristallen sowie zu Interkristallporen (Fototafeln 2 und 3, Bild e).

Calcitkristalle sind die häufigste Auskleidung der Klüfte, Drusen und Poren; seltener wurde Quarz beobachtet. Häufig wächst der Calcit kleinen Dolomitkristallen auf. Assoziiert mit den Karbonatmineralien kommen kleine Mengen von Erzen vor. Weitverbreitet, vom Dolomit der Lettenkohle bis in den Plattenkalk, ist weicher, weisser Kaolinit, der als jüngstes Klüftmineral Drusen und Klüfte ganz oder teilweise füllt (Fototafel 2, Bild e; Fototafel 3, Bilder c–d).

3.4.3 Quecksilber-Druckporosimetrie

Die Quecksilber-Druckporosimetrie erfolgte am Mineralogisch-petrographischen Institut der Universität Fribourg (M. Maggetti). Für die Bestimmungen wurden aus den Bohrkernen Klötzchen mit einer Kantenlänge von 5 – 10 mm gesägt und nach 24 Stunden Trocknung bei 100°C im

Porosimeter bis zu einem Druck von 2000 bar untersucht. Die Ergebnisse wurden als Porenvolumen, Porenoberfläche und Porenhäufigkeit in Abhängigkeit des Porenradius (Quecksilberdruck) unter folgenden Annahmen ausgewertet (Beilagen 4–6):

- a) zylindrische Poren,
- b) wasserfreie und evakuierte Poren,
- c) alle Poren kommunizierend.

Auf diese Weise wurden die Flaschenhalsporen in ihrem gesamten Inhalt mit ihren kleinsten Durchgängen charakterisiert.

Die in Tabelle 2 und Beilagen 4–6 zusammengestellten Ergebnisse zeigen folgendes:

Beim Opalinus-Ton ist die offene Makroporosität sehr gering und nimmt generell von oben nach unten ab. Diese Abnahme der Makroporosität hängt mit der Zunahme des Tonanteils zusammen. Bei den meisten Proben liegt das Häufigkeitsmaximum der Porenradien (oder Durchgänge) bei etwa 100 Å. Die breite Porenverteilung in den Jurensis-Mergeln scheint durch den hohen Karbonatanteil bedingt zu sein. Der hohe Tonanteil der Posidonienschiefer bewirkt die grosse Menge an kleinen Porenradien und die hohe spezifische Oberfläche der Poren. Der siltig-sandige Charakter der Obtusus-Tone ist wohl der Grund für die unregelmässige Porenradienverteilung und für die niedrige spezifische Oberfläche der Poren im oberen Abschnitt. Die Insektenmergel mit ihrem hohen Tonanteil sind durch eine Häufung von Poren mit Radien um 100 Å charakterisiert. Bei den Proben der Oberen bunten Mergel ist die unregelmässige Porenverteilung wohl durch den hohen Karbonatanteil bedingt.

Im Ton des Schilfsandsteins fällt die Häufung von Mikroporen mit Radien um 60 Å auf. Im Gipskeuper ist die Mikroporosität der untersuchten Proben äusserst gering. Bei einigen Tönen ist die Häufung von Porenradien um 50–60 Å feststellbar. Meistens sind die Mikroporen sehr unregelmässig verteilt. Dies dürfte mit dem hohen Dolomit- oder Anhydritanteil des Gesteins zusammenhängen, könnte aber auch auf sekundäre Porosität hinweisen. Die dichte, nicht bioklastische Facies im Plattenkalk weist eine geringe Mikroporosität auf; die bioklastische Facies dagegen zeichnet sich durch eine hohe sekundäre Porosität aus (Kapitel 4.2.2 und Fototafel 2).

3.5 Permeabilität

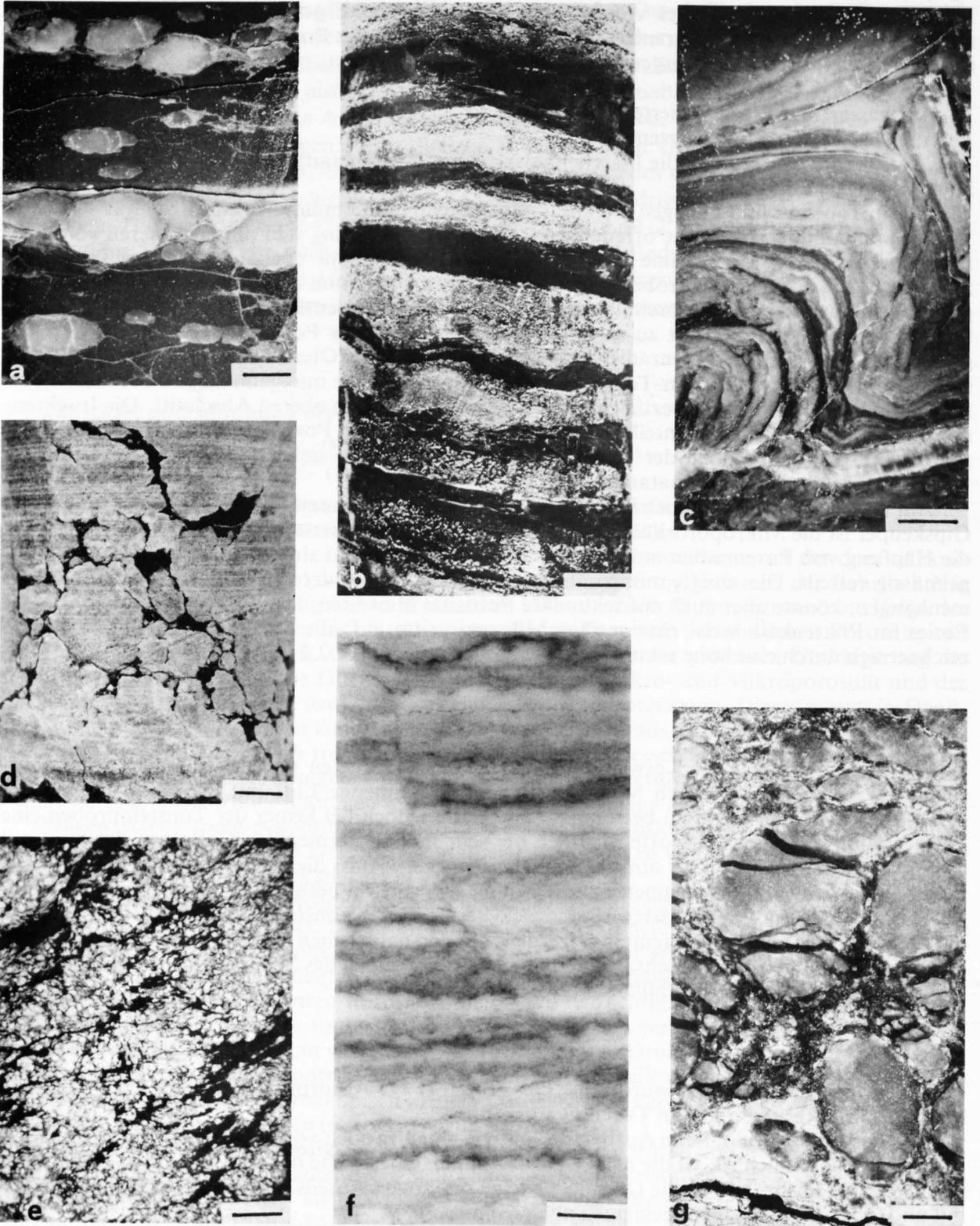
An den in Kapitel 3.4.1 erwähnten bei 110°C getrockneten Gesteinszylindern wurde versucht, die Permeabilität durch Messung der Durchflussmenge Luft mit dem von G. MÜLLER (1964) beschriebenen Gerät zu bestimmen. Es gelang jedoch bei keiner der Tonsteinproben eine Permeabilität zu messen, da offensichtlich bei sehr niedrig permeablen Gesteinen der maximal erzeugbare Überdruck von 0,1 atm zu gering ist. Dies zeigt, dass die herkömmlichen in der Erdölindustrie verwendeten Permeameter zur Messung sehr niedrig permeabler Tonsteine nicht genügen. Um diese zu messen, müssten Hochdruck-Permeameter konstruiert werden. Zudem müsste die Permeabilität mit Wasser gemessen werden, um den natürlichen Verhältnissen möglichst nahe zu kommen. Einige zu Vergleichszwecken an mehreren Proben des Schilfsandsteins durchgeführte Messungen ergaben Permeabilitäten bis 140 md.

3.6 Oberfläche

Die äussere Oberfläche wurde mit der Einpunkt-N₂-Absorption nach der BET-Methode bestimmt. Die Resultate sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Da der tonmineralogische Aufbau der untersuchten Proben vom Opalinus-Ton bis zur Keupergrenze sehr ähnlich ist, ist die nach BET bestimmte Oberfläche mit dem Tonanteil zu korrelieren. Bei den Triasproben ist die Oberfläche trotz des hohen Anteils an grobkristallisiertem Dolomit und/oder Anhydrit im allgemeinen noch recht gross.

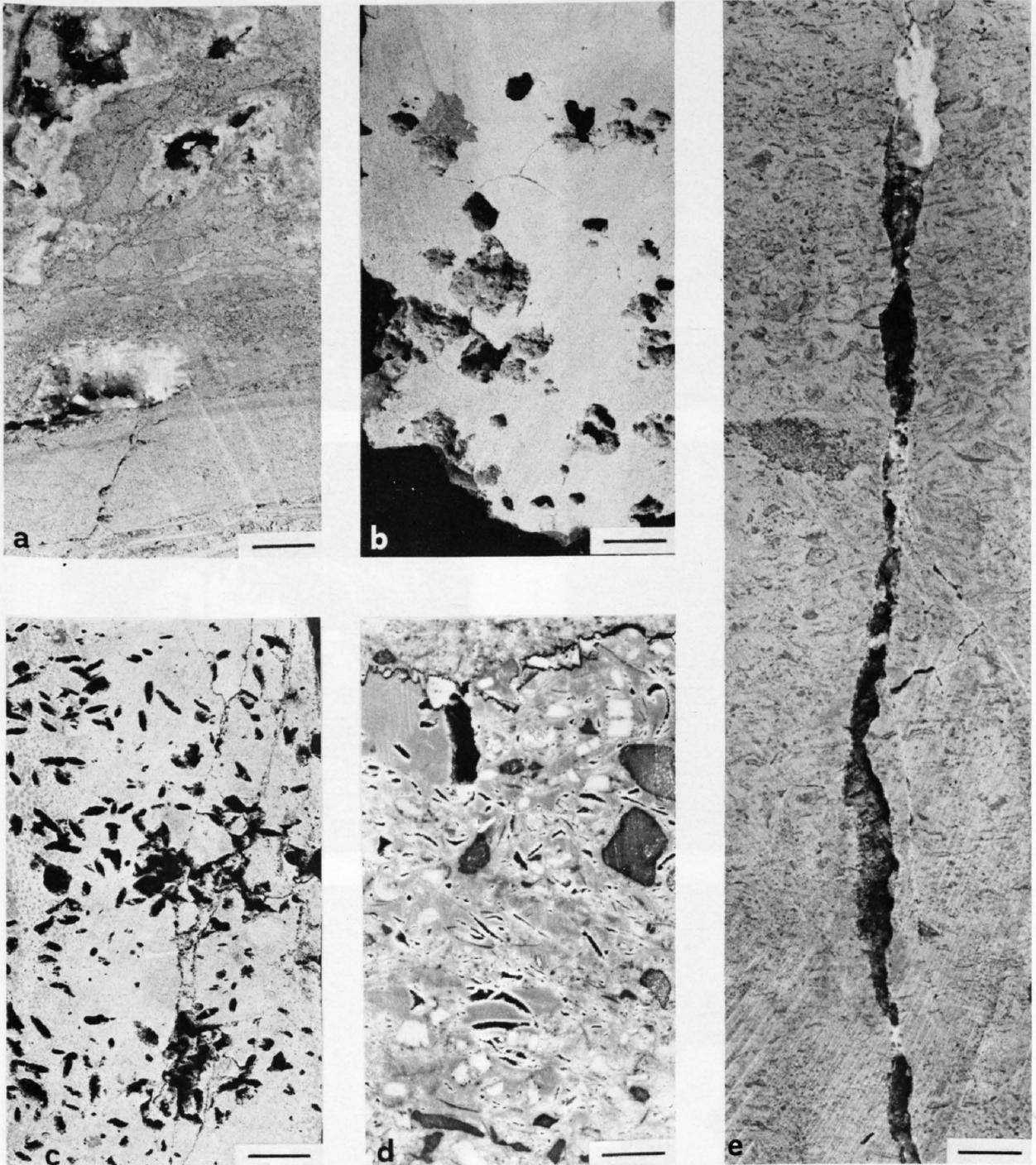
Die spezifische Oberfläche wurde mit der Glyzerin-Methode nach JACKSON (1964) bestimmt, wobei angenommen wird, dass sowohl die innere wie die äussere Oberfläche erfasst werden. Die innere Oberfläche ergibt sich somit aus der Differenz von spezifischer Oberfläche und der nach BET ermittelten äusseren Oberfläche. Proben mit hohem Anteil an quellfähigen Tonmineralien (Montmorillonit, Corrensit, Wechsellagerung Illit/Montmorillonit und z. T. Illit) zeigen höhere Werte für die innere Oberfläche als Proben, deren Anteil an quellfähigen Tonmineralien gering ist.



Fototafel 1

Wichtigste Strukturen von Anhydrit bzw. Gips im Kipskeuper und in der «Anhydritgruppe».

(a) Geschichtet-knolliger Anhydrit (212,50 m), (b) Geschichteter Anhydrit (175,95 m), (c) Verfalteter Anhydrit (312,60 m), (d) Mosaik-(chicken-wire-)Anhydrit (147,60 m), (e) knolliger Mosaik-Anhydrit (145,0 m), (f) Geschichtet massiver Anhydrit (317,60 m), (g) breccierter Anhydrit, Komponenten randlich durch Gips ersetzt (141,50 m).
 Masstab ist 1 cm.

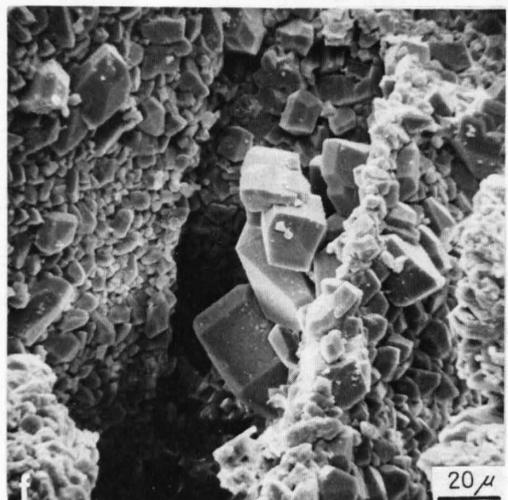
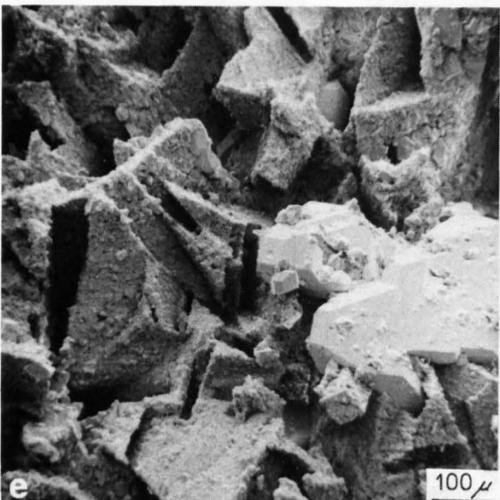
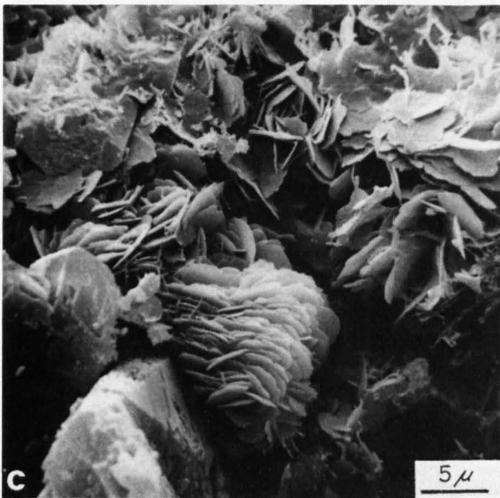
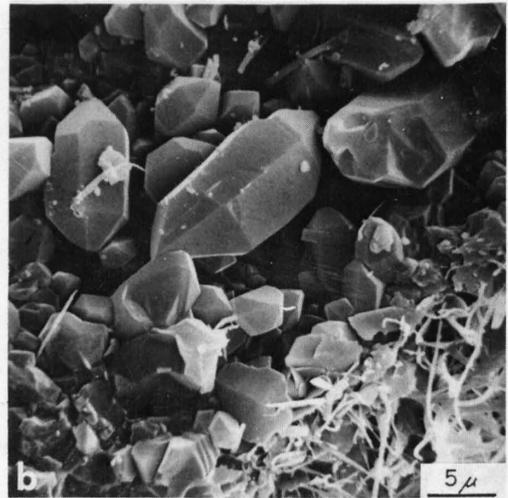
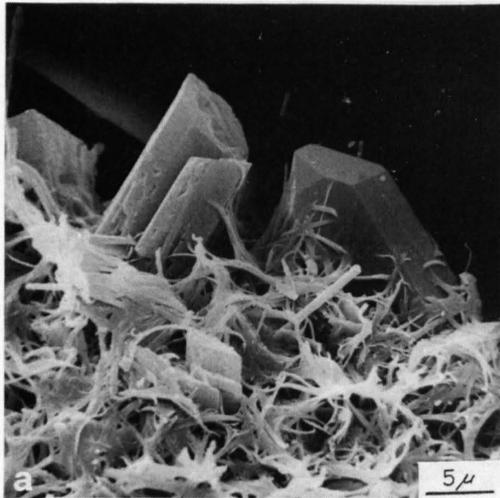


Fototafel 2

Sekundäre Porosität in den Kalken und Dolomiten des Muschelkalks.

(a) Drusen mit Calcit ausgekleidet (295,90 m), (b) Lösungsporen von Anhydritknöllchen (242,30 m), (c) Lösungsporen von sekundärem Anhydrit (292,30 m), (d) Partikellösungsporen (276,40 m), (e) offene Kluft, z. T. mit authigenem Kaolinit (weiss) (258,20 m).

Massstab ist 1 cm.



Fototafel 3

REM-Aufnahmen von Neubildungen im Porenraum.

Schilfsandstein mit authigenem Quarz, Dolomit, ?Illit (a, b, 125,48 m) und einem weiteren Tonmineral (c, 120,57 m), (d) Kaolinit-«Bücher» (Trigonodus-Dolomit, 235,32 m), (e) offene Mikroporen nach Gipskristallen mit (f) gelegentlicher Neubildung von Dolomit (Trochitenkalk, 288,45 m).

Tabelle 1: Gesteinsdichte, Korndichte und absolute Porosität

Probe Tiefe in m	Geolog. Formation	Gesteinsdichte g cm ⁻³	Korndichte g cm ⁻³	Porosität %
24,23- 24,32	Opalinus-Ton	2,337	2,74	14,6
28,40- 28,58		2,347	2,75	14,5
29,39- 29,53		2,348	2,66	10,5
34,32- 34,40		2,380	2,67	10,9
35,91- 35,98		2,339	2,64	11,4
39,13- 39,20		2,397	2,74	12,4
43,93- 44,03		2,371	2,71	12,5
49,21- 49,30		2,365	2,72	12,9
54,20- 54,34		2,346	2,66	11,7
58,53- 58,63		2,375	2,75	13,5
61,49- 61,60		2,374	2,65	10,6
64,75- 64,95		2,319	2,71	14,4
66,68- 66,82		Jurensis-Mergel	2,584	2,77
71,32- 71,55	Posidonienschiefer	2,223	2,55	12,9
74,20- 74,37		2,096	2,38	11,8
75,35	Amaltheenschichten bis Numismalis-Sch. Obtusus-Tone	2,567	2,75	8,7
75,45		2,581	2,71	4,8
75,58		2,494	2,73	8,8
77,58- 77,75		2,412	2,67	9,7
80,33- 80,53		2,518	2,74	8,0
82,99- 83,14		2,391	2,72	12,1
88,75- 88,90		2,392	2,75	13,1
92,51- 92,67	Insektenmergel	2,350	2,69	12,6
114,96-115,19	Schilfsandstein	2,231	2,65	15,7
116,40-116,50		2,286	2,68	14,6
119,88-119,95		2,212	2,62	15,5
120,57-120,75		2,349	2,72	13,6
125,28-125,43		2,102	2,65	20,7
130,92-131,00		2,101	2,78	24,4
150,25-150,40	Gipskeuper	2,583	2,75	6,3
156,72-156,82		2,806	2,92	3,9
172,65-172,86		2,919	2,98	1,9
188,50-188,59		2,946	3,02	2,3
190,05-190,10		2,375	2,57	7,8
202,50-202,55		2,515	2,79	10,0
212,78-212,85		2,582	2,78	7,2
234,50-234,81	Trigonodus-Dolomit	2,261	-	-
251,06-251,11		2,526	-	-
278,97-279,02	Trochitenkalk	2,703	-	-
295,15-295,20	Dol.d."Anhydritgr."	2,133	-	-
317,80-317,86	Obere Sulfatschichten	2,901	-	-
317,68-317,74		2,915	-	-

Tabelle 2: Quecksilber-Druckporosimetrie
Offene Makro- und Mikroporosität und spezifische Oberfläche

Probe Tiefe in m	Geolog. Formation	Offene Porosität (cm ³ /g)			Spez. Oberfläche m ² /g
		Makro	Mikro	Gesamt	
24,23- 24,32	Opalinus-Ton	0,0065	0,0414	0,0479	8,516
28,40- 28,58		0,0060	0,0389	0,0449	5,837
29,39- 29,53		0,0024	0,0382	0,0406	6,377
34,32- 34,40		0,0019	0,0327	0,0346	5,575
35,91- 35,98		0,0030	0,0351	0,0381	6,145
39,13- 39,20		0,0000	0,0430	0,0430	7,228
43,93- 44,03		0,0016	0,0398	0,0414	7,848
49,21- 49,30		0,0016	0,0354	0,0370	8,210
54,20- 54,34		0,0009	0,0326	0,0335	9,472
58,53- 58,63		0,0005	0,0377	0,0382	9,484
61,49- 61,60		0,0003	0,0343	0,0346	8,720
64,75- 64,95	0,0016	0,0306	0,0322	7,081	
66,68- 66,82	Jurensis-Mergel	0,0006	0,0257	0,0263	4,094
71,32- 71,55	Posidonienschiefer	0,0010	0,0425	0,0435	9,957
74,20- 74,37		0,0010	0,0338	0,0345	8,177
77,58- 77,75	Obtusius-Tone	0,0010	0,0340	0,0350	4,343
80,33- 80,53		0,0001	0,0298	0,0299	3,804
82,99- 83,14		0,0016	0,0351	0,0367	5,125
88,75- 88,90		0,0036	0,0415	0,0451	7,388
92,51- 92,67	Insektenmergel	0,0006	0,0355	0,0361	7,637
100,46-100,66	Ob. bunte Mergel	0,005	0,0405	0,0410	6,398
104,95-105,05		0,0013	0,0288	0,0301	4,405
130,92-131,00	Schilfsandstein	0,0332	0,0167	0,0499	9,010
150,25-150,40	Gipskeuper	-	0,0191	0,0191	6,090
156,72-156,82		0,0133	0,0047	0,0180	0,440
172,65-172,86		0,0112	0,0081	0,0193	1,230
188,50-188,59		-	0,0018	0,0018	0,060
190,05-190,10		0,0106	0,0367	0,0473	9,670
202,50-202,55		0,0247	0,0140	0,0387	1,850
262,68-262,85	Plattenkalk	0,0332	0,0167	0,0499	3,750

Tabelle 3: Äussere Oberfläche und spezifische Oberfläche toniger Proben

Probe Tiefe in m	Geolog. Formation	Oberfläche BET m ² /gr	Spez. Oberfläche Glyzerin m ² /gr
24,00- 31,04	Opalinus-Ton	24,8	137
31,04- 38,61		25,7	125
38,61- 46,15		31,4	135
46,15- 53,65		34,9	121
53,65- 60,25		32,3	151
60,25- 65,73		34,6	167
71,32- 71,55	Posidonienschiefer	24,8	127
74,20- 74,37		22,1	182
82,99- 83,14	Obtusius-Tone	31,0	169
88,70- 88 90		42,2	181
100,46-100,66	Obere bunte Mergel	38,6	78
104,95-105,05		25,9	143
110,40-110,43	Untere bunte Mergel	50,3	35
130,92-131,00	Schilfsandstein	42,5	152
150,25-150,40	Gipskeuper	30,4	123
190,05-190,10		38,5	97
212,78-212,85		18,7	172
303,01-303,15	Obere Sulfatschichten der "Anhydritgruppe"	27,2	262

Tabelle 4: Gehalte an Karbonat- und Sulfatmineralien von Einzelproben des Keuper und Muschelkalks

- = bestimmt aber unter Nachweisbarkeitsgrenze

Probe Tiefe in m	Calcit Gew. %	Dolomit Gew. %	Anhydrit Gew. %	Gips Gew. %	Probe Tiefe in m	Calcit Gew. %	Dolomit Gew. %	Anhydrit Gew. %	Gips Gew. %
103,37-103,42	-	51	-	-	226,22-226,29	-	95	-	-
105,76-105,85	-	88	-	-	229,60-229,70	-	97	-	-
106,85-106,93	-	96	-	-	232,00-232,13	-	95	-	-
109,55	-	24	-	-	235,61-235,67	6	91	-	-
109,78	-	83	-	-	236,90-236,98	-	93	-	-
110,40-110,43	-	1-2	-	-	238,55-238,63	-	93	-	-
112,70-112,73	0-1	-	-	-	241,45-241,50	-	89	-	-
114,12-114,20	1-2	9	-	-	245,09-245,18	-	90	-	-
114,96-115,19	1-2	1-2	-	-	248,23-248,25	-	90	-	-
116,40-116,50	1-2	2	-	-	251,91-252,05	-	86	-	-
120,37-120,39	1-2	20	-	-	253,69-253,76	-	90	-	-
120,57-120,75	1-2	0-1	-	-	245,61	-	84	-	-
125,28-125,43	0-1	81	-	-	255,19-255,24	-	15	-	-
125,90-125,98	-	27	-	-	255,75-255,95	55	32	-	-
126,30-126,34	1-2	44	-	-	256,29-256,39	45	44	-	-
126,34 126,36	1	81	-	-	257,06-257,10	31	35	-	-
126,65-126,73	-	60	-	-	258,57-258,78	1-2	91	-	-
127,00	-	53	-	-	259,22-259,27	78	19	-	-
128,75-128,80	1	38	-	-	259,41-259,52	77	20	-	-
130,92-131,00	1	0-1	-	-	261,85	6	50	-	-
131,85-131,87	4	84	-	-	262,39-262,46	74	18	-	-
134,00-134,04	-	56	-	-	263,82-263,88	62	30	-	-
134,90-134,92	-	0-1	-	-	266,21-266,26	58	36	-	-
135,72-135,80	0-1	0-1	3	47	269,02-269,05	67	27	-	-
138,75-138,80	0-1	84	-	40	270,80-270,85	88	8	-	-
139,31-139,35	0-1	0-1	15	39	271,81-271,86	64	26	-	-
142,27-142,35	0-1	0-1	44	5	274,90-274,92	84	13	-	-
145,30-145,40	1	-	-	-	275,40-275,48	82	16	-	-
150,25-150,40	-	41	-	-	278,66-278,70	66	25	-	-
156,72-156,80	1	13	-	-	280,68-280,80	79	10	-	-
159,00-159,17	-	8	-	-	280,93	10	47	-	-
172,65-172,86	5	26	-	10	286,78-286,85	87	9	-	-
181,27-181,35	1-2	5	16	1	288,87-288,98	55	41	-	-
181,35-181,37	-	95	-	1	289,53-289,58	81	13	-	-
181,55	-	-	89	1	290,00	85	13	-	-
184,05-184,10	-	2	97	1	290,35-290,40	61	34	-	-
188,50-188,59	-	75	16	-	290,85-290,90	72	24	-	-
189,21-189,28	-	5	18	-	291,77-291,81	6	86	-	-
190,05-190,10	1	12	48	-	292,20-292,22	88	7	-	-
193,00-193,15	0-1	5	48	-	292,77-292,80	17	77	-	-
202,50-202,55	0-5	8	53	-	294,20-294,25	69	25	-	-
209,29-209,38	0-5	8	87	-	294,60-294,65	5	76	-	-
210,77-210,81	1	46	-	-	295,01-295,06	-	71	-	-
212,78-212,85	1	69	20	0-1	297,41-297,47	-	57	-	-
213,55-213,60	7	7	27	57	298,15-298,20	-	85	-	-
216,16-216,21	-	88	-	-	300,50-300,55	7	76	-	-
216,63-216,67	-	84	-	-	301,29-301,34	13	65	-	-
217,04-217,12	4	5-6	-	-	302,63-302,67	3	82	-	-
217,38-217,42	-	3	-	-	306,62-306,65	5	74	-	-
219,18-219,20	89	0-1	-	-	307,25-307,27	-	-	-	84
219,74-219,81	1	89	-	-	308,82-309,00	9	31	-	15
219,96-220,05	1-2	89	7	-	309,60-309,68	-	43	-	25
220,30	-	96	-	-	311,13-311,20	1	46	-	-
220,89-220,93	7	94	-	-	312,80-312,83	0-1	81	-	-
222,23-222,28	-	97	-	-	313,79-313,85	1-2	15	-	-
222,81-222,90	-	95	-	-	316,00-316,06	-	67	-	-
223,34-223,40	-	95	-	-	320,75-320,79	1-2	14	-	-
224,14-224,19	-	95	-	-					

4. Mineralogische Untersuchungen an Bohrkernen

(Tj. Peters, Mineralogisch-petrographisches Institut der Universität Bern)

4.1 Mineralogie der Gesamtproben

4.1.1 Methodik

Für die quantitative Bestimmung der Mineralphasen wurden die feingemahlten Proben mit LiF im Verhältnis 10:1 gemischt und anschliessend in desorientiertem Zustand (PETERS 1964) mit dem drehenden Probehalter auf dem Pulver-Diffraktometer geröntgt. Aus den Intensitätsverhältnissen – Intensität Reflex von gesuchtem Mineral zu Intensität Reflex von LiF (interner Standard) – wurden unter Zuhilfenahme von Eichkurven die Quarz- und Feldspatgehalte bestimmt. Die Calcit-, Dolomit-, Gips- und Anhydritgehalte wurden aus dem coulometrisch bestimmten anorganischen CO₂- bzw. Schwefelgehalt und dem röntgenographisch bestimmten Calcit/Dolomit-Vbzw. Gips/Anhydrit-Verhältnis ermittelt (Tabellen 4 und 5).

4.1.2 Ergebnisse

Die Resultate der röntgenographischen Bestimmung der Mineralgehalte sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Die Durchschnittsproben aus dem Opalinus-Ton enthalten neben den Tonmineralien vor allem Quarz und Calcit. Die Feldspäte treten in geringen Mengen auf, wobei Albit überwiegt. Im stratigraphischen Profil nimmt generell der Quarz- und Feldspatanteil von oben nach unten ab. Gleichzeitig nimmt der Gehalt an Tonmineralien zu. Der Karbonatanteil ist in den obersten Metern am höchsten, doch ist sein Anteil in den Durchschnittsproben über das ganze Profil ziemlich konstant. Der Gehalt an Dolomit ist sehr gering (0–2%) und röntgenographisch oft kaum nachweisbar. Der Anteil an Pyrit schwankt zwischen 0,5 und 1,5%.

Die untersuchte Probe aus den Jurensis-Mergeln ist ein mergeliger Kalk mit sehr wenig Quarz (5%). Das Karbonat besteht neben Calcit aus ankeritischem Dolomit. Letzterer zeigt gegenüber reinem Dolomit eine deutliche Linienverschiebung nach höheren d-Werten und eine erhöhte Intensität der Reflexe.

Die beiden Proben aus den Posidonienschiefern bestehen etwa zu 50% aus Tonmineralien und Glimmer. Der Rest setzt sich vor allem aus Calcit und untergeordnet aus Dolomit zusammen. Der Quarz- und Feldspatanteil liegt bei 10–15%. Der Anteil an organischem Material ist sehr hoch. Er erreicht 4,13 bzw. 9,13 Gew.-% der Gesamtprobe.

Der sandige Charakter der Obtusus-Tone zeigt sich in den hohen, nach oben etwas ansteigenden Quarzgehalten (25–47%). Meist ist der Karbonatgehalt (5–10%) mässig, mit Ausnahme einer karbonatischen Bank im mittleren Bereich. Diese Bank besteht zu etwa 35% aus ankeritischem (Fe-reichem) Dolomit.

Aus dem Insektenmergel wurde nur eine Probe untersucht; ihre Zusammensetzung mit 20% Quarz und 10% Karbonat und sehr viel Tonmineralien entspricht den an Proben benachbarter Insektenmergel-Vorkommen ermittelten Werten (PETERS 1964).

Die Oberen bunten Mergel enthalten nur Dolomit als Karbonat. Der Anteil an Feldspat ist im Verhältnis zum geringen Quarzanteil relativ hoch.

In den Unteren bunten Mergeln sind die Gesteine sehr reich an Tonmineralien. Der geringe Karbonatanteil ist als Dolomit ausgebildet.

Der Schilfsandstein enthält trotz seiner Feinkörnigkeit neben Quarz grosse Anteile an Albit und Kalifeldspat. Die erzmikroskopische Untersuchung einer erzreichen Zone zeigte eine Zementation von Quarz und Feldspat durch Pyrit. Hierbei ist die ursprüngliche Tonmatrix von Pyrit verdrängt. Gegen die Tonmatrix zeigt Pyrit idiomorphe Begrenzungen. Ausserhalb der Erzzone tre-

ten vereinzelte idiomorphe Pyritkriställchen in der von Hämatit-Pigment durchsetzten Tonmatrix auf. Neben Pyrit wurden einige grössere Graphit-Blättchen identifiziert. Die stark verbogenen Blättchen deuten auf eine detritische Einschwemmung hin.

Die Mergel des Gipskeuper sind nur im oberen Teil gipshaltig, sonst überwiegt Anhydrit als Sulfat-Mineral. Bei den Karbonaten dominiert Dolomit sehr stark über Calcit. Der Quarzanteil ist im allgemeinen sehr gering, und Feldspäte lassen sich kaum nachweisen. Im oberen Teil treten einige sehr tonreiche Schichten auf. Ein Erzschliff bei 213,55 m zeigte homogen verteilte Pyritkörner, die stellenweise zu Aggregaten vereinigt sind. Zwischen Quarzkörnern tritt Pyrit ohne Eigen-gestalt auf, sonst sind die Körner idiomorph.

Der Übergang zur Lettenkohle zeigt sich durch eine Erhöhung des Quarz- und Feldspat-Gehalts an. Auffallend sind der sehr hohe Kalifeldspat-Gehalt (bis 35%) und das gleichzeitige Fehlen von Albit in der Lettenkohle. Bei diesem Kalifeldspat handelt es sich um eine 100% mono-kline Varietät, wie sie für authigene oder vulkanische Bildungen charakteristisch ist. Die Karbo-nate der Lettenkohle bestehen aus etwa gleichen Anteilen Calcit und Dolomit. Bei 218,27 m treten im feinkörnigen Gestein dispers verteilte idiomorphe Pyritkörner auf. In einer Zone mit zahlrei-chen Fossilbruchstücken und mit organischem Material erscheint Pyrit als Füllung im organi-schen Material und als rundliche Gebilde. Kleine Mengen Kupferglanz und ein weiteres bis jetzt unbestimmtes Erz können ebenfalls betrachtet werden.

Im Trigonodus-Dolomit treten alle andern Mineralphasen neben Dolomit stark zurück.

Beim Plattenkalk überwiegt Calcit meist über Dolomit; der Anteil an Quarz und Tonminera-lien bleibt aber ebenso wie im Trochitenkalk noch sehr gering (3-10%). Ein Erzschliff bei 292,83 m zeigt Erz in teilweise gefüllten Drusen. Es handelt sich hierbei vorwiegend um zonierte Pyrite, die aber z. T. um einen Kern von Arsenopyrit gewachsen sind. Erzschliffe bei 294,76 m und 296,37 m zeigen reichlich dispers verteilte mehr oder weniger idiomorphe Pyritkörner, die stellenweise zu grösseren Aggregaten vereinigt sind. Bei 298,00 m im Dolomit der «Anhydrit-gruppe» sind an den mit feinkörnigem Pyrit imprägnierten Wänden von meist mit Dolomit gefüll-ten Drusen relativ grosse (0,1-1 mm) stengelige Markasite angelagert.

Im oberen Teil der Oberen Sulfatschichten der «Anhydritgruppe» tritt reichlich Gips auf, nach unten dagegen praktisch nur noch Anhydrit als Sulfatmineral. Neben den Sulfaten und Kar-bonaten kann der Anteil an Tonmineralien, Quarz- und Feldspäten bis zu 50% betragen.

4.2 Tonmineralogie

4.2.1 Methodik

Die Fraktionen < 2 Micron wurden mit Hilfe von Atterberg-Zylindern aus den gemahlene-n Proben abgetrennt (MÜLLER-VON MOOS, 1971). Nach der Dekarbonatisierung mit 2n HCl wurden die Tonfraktionen mit Ca^{2+} abgesättigt und als Suspension auf Glasplättchen sedimentiert. Von jeder Probe wurden mindestens drei Präparate hergestellt: ein erstes wurde luftgetrocknet, ein zweites mit Äthylenglykol abgesättigt und ein drittes bei 550 °C während 60 Minuten geheizt. Die-se Präparate wurden von 1 bis 35° 2 θ mit Cu K α -Strahlung auf dem Diffraktometer geröntgt. Aus den Intensitäten der Basisreflexe wurden die Tonmineralverhältnisse ermittelt. Da die einzel-nen Tonmineralien aus verschiedenen Gesteinsformationen Unterschiede sowohl im Kristallisa-tionsgrad als auch in der Mineralchemie aufweisen, sind die quantitativen Bestimmungen mit relativ grossen Fehlern behaftet.

4.2.2 Ergebnisse

Die röntgenographisch bestimmten Tonmineralverhältnisse der untersuchten Proben sind in Tabelle 6 und einige typische Diffraktogramme in Beilage 7 zusammengestellt.

In den Opalinus-Tonproben konnten Illit, Kaolinit, Chlorit und Illit/Montmorillonit-Wech-sellagerungsstrukturen identifiziert werden. Der Illit ist an seinem Basisreflex bei 10 Å, der auch

nach Äthylenglykol-Behandlung erhalten bleibt, zu erkennen. Dieser Reflex ist relativ breit, und die nach KÜBLER bestimmte Illitkristallinität variiert zwischen 8 und 15, was für den Diagenese-Bereich typisch ist. In allen bestimmten Fällen sind sowohl Modifikationen des 2M₁ und des 1 Md-Typs vorhanden. Der Kaolinit ist durch seine Basisreflexe bei 7 Å und 3,54 Å angezeigt. Der Reflex bei 3,54 Å wurde für die quantitative Abschätzung gegenüber Chlorit (3,50 Å) herangezogen. In den bei 550 °C gebrannten Präparaten verschwinden die Basisreflexe des Kaolinites. Im allgemeinen ist der Kaolinit schlecht kristallisiert. Chlorit ist schwieriger nachzuweisen, da sich bei kleinen Gehalten die Überlagerung mit den Basisreflexen des Kaolinites bemerkbar macht. In den meisten Präparaten sind die 14-Å- und die 4,73-Å-Reflexe von Chlorit erkennbar. Aufgrund der Intensitätsverteilung der Basisreflexe und des Verhaltens beim Brennen handelt es sich um einen Chlorit mit mittlerem Mg/Fe-Verhältnis. Die Wechsellagerungsstruktur Illit/Montmorillonit erkennt man bei den lufttrockenen Präparaten als Verbreiterung des Illit-10-Å-Reflexes nach höheren d-Werten. Nach der Äthylenglykol-Behandlung ist diese Schulter des Illits verschwunden, es bleibt ein symmetrischer 10-Å-Reflex, aber im Bereich um 12 Å ist ein nicht scharf begrenzter Reflex sichtbar.

Es handelt sich hier um eine unregelmässige Wechsellagerung (mixed-layer) von Illit und Montmorillonit in verschiedenen Verhältnissen. Das Verhältnis Illit- zu Montmorillonitschichten schwankt etwa von 7:3 zu 5:3 mit einer Häufung um 6:3.

Die Mengenverhältnisse der Tonminerale Illit, Kaolinit und Chlorit variieren im ganzen Opalinus-Tonprofil wenig. Nur die Gehalte an Wechsellagerung Illit/Montmorillonit, deren quantitative Erfassung allerdings am schwierigsten ist, sind mit dem Tonanteil positiv korrelierbar. Je feinkörniger die Probe, um so grösser die Menge an Wechsellagerung Illit/Montmorillonit, was mit der Teilchengrösse dieser Mineralart zusammenhängt.

Die Tonmineralogie der Probe aus den Jurensis-Mergeln ist praktisch mit derjenigen der Opalinus-Tonproben identisch. Auch die Mengenverhältnisse von Illit, Kaolinit, Chlorit und Wechsellagerung Illit/Montmorillonit liegen im gleichen Streubereich.

Bei den Proben der Posidonienschiefer ist im Vergleich zu den darüberliegenden Schichten der Anteil an Illit signifikant grösser. Dies geht auf Kosten der Menge an Kaolinit, dessen Anteil zwischen 20 und 25% beträgt.

In den Obtusus-Tonen ist die tonmineralogische Vergesellschaftung ähnlich wie beim Opalinus-Ton. Betrachtet man die Mengenverhältnisse, so stellt man von oben nach unten eine Zunahme des Illit-Gehalts und eine Abnahme des Kaolinit-Gehalts fest. Diese Verschiebung der Mengenverhältnisse lässt sich mit der Abnahme der Korngrösse von oben nach unten korrelieren.

Die Insektenmergel sind tonmineralogisch fast gleich zusammengesetzt wie die untersten Schichten der Obtusus-Tone.

Dagegen findet man in den Proben der Oberen bunten Mergel eine andere Tonmineralparagenese. Die Tonfraktion besteht fast ausschliesslich aus Illit und einer Illit/Montmorillonit-Wechsellagerung. Kaolinit fehlt vollkommen, und die Anteile an Chlorit sind sehr gering. Der Kristallinitätsgrad des Illits ist deutlich niedriger als in den jüngeren Formationen. In einer 1964 veröffentlichten Arbeit hat PETERS angenommen, dass sich während der Ablagerung dieser Formation statt muskowitzischen Illits und Chlorits stark phengitischer Illit gebildet hat.

In den Unteren bunten Mergeln findet man neben Illit nur Chlorit. Am Übergang zum Schilfsandstein tritt Kaolinit in kleinen Mengen auf. Der Anteil an Kaolinit neben Illit, Chlorit und kleinen Mengen Illit/Montmorillonit-Wechsellagerung kann im Schilfsandstein bis zu 30% betragen.

Um den röntgenologischen Nachweis des Kaolinites zu bestätigen, wurden IR-Spektren im Bereich 4000–2500 cm⁻¹ aufgenommen. In diesen Spektren erkennt man Kaolinit an einer Absorptionsbande bei 3700 cm⁻¹.

Neben Illit und Chlorit enthält der Gipskeuper Corrensit, eine regelmässige Wechsellagerungsstruktur von Chlorit mit Montmorillonit im Verhältnis 1:1. In der Beilage 4 erkennt man den Corrensit an einer Abfolge von Reflexen, die sich bei der Äthylenglykol-Behandlung nach höheren d-Werten und beim Brennen bei 550 °C nach tieferen d-Werten verschieben.

Gegen die Lettenkohle zu erscheint wieder Kaolinit, der in der eigentlichen Lettenkohle neben Illit das einzige Tonmineral bildet.

Vom Trigonodus-Dolomit und Plattenkalk wurden nur wenige Tonmineralverhältnisse bestimmt; hier überwiegt Illit. Als Drusenfüllung auftretender Kaolinit ist eine späte Neubildung aus zirkulierendem Wasser und nicht eine Einschwemmung aus benachbarten Schichten.

In den Oberen Sulfatschichten der «Anhydritgruppe» erscheinen neben Illit die Mg-reichen Tonminerale Chlorit, Corrensit und Montmorillonit. Bei der Probe 311,13–311,20 m ist im Röntgendiagramm der erste Basisreflex von Corrensit bei niedrigen 2θ sehr gut erkennbar.

Die Werte für die Illit-Kristallinität vom Opalinus-Ton bis zum Schilfsandstein würden in den Bereich der Diagenese fallen ($\geq 7,5$). Die Werte der Illit-Kristallinität für die tieferen Schichten sind deutlich niedriger und wären charakteristisch für die Anchimetamorphose. Da jedoch die Überlagerung dieser Schichtreihe nie so gross war, dass es zur Anchimetamorphose kommen konnte, muss es sich wohl um detritisch eingeschwemmten, gut kristallisierten Illit handeln.

4.3 Thermochemie

Verschiedene thermochemische Methoden wie differentielle Thermoanalyse (DTA), Thermogravimetrie (TG), Dilatometrie und Wärmeleitfähigkeit wurden an Kernproben angewendet. Die Ergebnisse erlaubten, einerseits das Verhalten der Materialien auf thermische Beanspruchung abzuklären, andererseits die mineralogischen Eigenschaften näher zu charakterisieren.

4.3.1 Differentielle Thermoanalyse (DTA)

Die DTA-Untersuchung wurde an 250 mg der gemahlten Gesamtproben durchgeführt. Die Aufheizgeschwindigkeit betrug 10°C pro Minute, und die Ofenatmosphäre bestand aus Luft. In Beilage 8 sind die Ergebnisse zusammengestellt.

Die DTA-Kurven der Opalinus-Tonproben zeigen bei 100°C nur eine kleine endotherme Reaktion, verursacht durch die Abgabe von absorbiertem Wasser. Auch in den TG-Kurven (Beilage 9) ist der Gewichtsverlust bei 100°C gering, was auf eine fortgeschrittene Entwässerung des vor allem an den Tonmineralien adsorbierten Wassers hinweist. Die im Bereich $200\text{--}400^\circ\text{C}$ auftretenden exothermen Reaktionen sind auf die Oxydation der organischen Substanz und des Pyrits zurückzuführen. Die breite endotherme Reaktion bei 500°C rührt von der Abgabe des Hydroxylwassers her. Das Einsetzen dieser Reaktion bei 550°C ist für illitische und kaolinitische Tone charakteristisch. Die starke endotherme Reaktion im Bereich von $800\text{--}900^\circ\text{C}$ wird durch die Abgabe des am CaCO_3 gebundenen CO_2 bedingt.

In den DTA-Kurven der Posidonienschiefer fällt eine aus mehreren Teilreaktionen bestehende exotherme Reaktion zwischen 200 und 400°C auf. Diese wird durch die Oxydation der organischen Bestandteile und des Pyrits verursacht. Der breite endotherme Peak mit einem Minimum von 500°C charakterisiert die Abgabe des OH-Wassers von Illit und Kaolinit.

Zwischen 700 und 900°C zerfallen Dolomit und Calcit, wobei die endotherme Reaktion bei niedrigeren Temperaturen für Dolomit charakteristisch ist.

Die auf den DTA-Kurven von zwei Obtusus-Tone-Proben feststellbare schwach endotherme Reaktion bei 500°C wird vor allem durch die relative Grobkörnigkeit der Proben bedingt. Der Zerfall des Calcits verursacht die endotherme Reaktion bei 800°C .

In den DTA-Kurven der Oberen bunten Mergel dominiert der Zerfall des Dolomits mit den starken endothermen Reaktionen bei 700°C und 850°C (Abgabe des an Ca gebundenen CO_2) den Verlauf. Auf die Anwesenheit von Illit deutet der endotherme Peak bei 550°C .

4.3.2 Thermogravimetrie (TG)

Bei den thermogravimetrischen Untersuchungen wurden jeweils 100 mg der Gesamtproben mit 2°C pro Minute in Luftatmosphäre in einer Thermowaage aufgeheizt. Die TG-Kurven sind in Beilage 9 aufgezeichnet.

Die Kurven der Durchschnittsproben des Opalinus-Tons und der Obtusus-Tone zeigen einen ziemlich ähnlichen Verlauf, mit einer Gewichtsabnahme in drei Stufen: eine erste zwischen 50 °C und 100 °C, wobei das absorbierte Wasser abgegeben wird, eine zweite zwischen 450 °C und 600 °C, wo das Hydroxylwasser entweicht und eine dritte zwischen 700 °C und 750 °C, wo die CO₂-Abgabe der Karbonate erfolgt. Im Bereich zwischen der ersten und der zweiten Stufe tritt ein Gewichtsverlust auf, bewirkt durch Verbrennung organischer Substanz und Abgabe von am Rande der Teilchen gebundenem OH.

Bei den Posidonienschiefern sind die Gewichtsverluste in der ersten (bis 110 °C) und der zweiten Stufe (bis 500 °C) wegen des erhöhten Gehalts an Tonmineralien gross. Die Gewichtszunahme bei 220 °C dürfte auf die Oxydation des Pyrits zurückzuführen sein.

Die Gewichtsverlustkurven der Oberen bunten Mergel zeigen nur zwei Stufen: eine erste von 20 bis 100 °C und eine zweite von 400 bis 800 °C. Bei der letzteren geht der Gewichtsverlust, verursacht durch die Abgabe des OH-Wassers, kontinuierlich über in die CO₂-Abgabe des Dolomits.

4.3.3 Dilatometrie

Mit einem Dilatometer wurde die lineare Ausdehnung oder Schrumpfung des Untersuchungsmaterials bei zunehmenden Temperaturen ermittelt. Als Messproben dienten Stäbchen, welche mit 7 × 7 mm Ø und Längen von 25 bis 50 mm parallel der Schichtung und senkrecht zur Schichtung aus den Bohrkernen herausgesägt wurden. Die Stäbchen wurden mit 5 °C pro Minute aufgeheizt, und die Längenänderung wurde mit einem Wegaufnehmer gemessen und kontinuierlich registriert.

Die Resultate von einzelnen Proben aus dem Opalinus-Ton sind in Beilage 10 dargestellt. Als Vergleich wurde die lineare Ausdehnung von Quarz parallel zu c ebenfalls aufgezeichnet.

Die parallel der Schichtung geschnittenen Stäbchen dehnen sich im untersuchten Temperaturbereich von 20 bis 400 °C praktisch kontinuierlich aus. Bei den senkrecht zur Schichtung geschnittenen Proben tritt zwischen 50 °C und 80 °C eine sehr starke Dehnung auf, die um 100 °C von einer starken Kompression abgelöst wird. Die Dehnung wird durch das Aufblättern der Schichtsilikate (Tonmineralien) verursacht. Ihr Betrag ist von der Aufheizgeschwindigkeit abhängig, da bei schnellem Aufheizen das Zwischenschichtwasser nicht rasch genug seitlich entweichen kann.

Angaben über die thermische lineare Ausdehnung von Gesteinen sind in der Literatur selten. Im «Handbook of Physical Constants» von CLARK (1966) wird für die linearen Ausdehnungskoeffizienten $1/L \times \Delta L/\Delta T$ zwischen 20 und 100 °C angegeben:

Tonsteine	$9 \pm 1 \times 10^{-6}$	(3 Bestimmungen)
Quarzite	11×10^{-6}	(2 Bestimmungen)
Kalke	$8 \pm 4 \times 10^{-7}$	(20 Bestimmungen)

Die an den Opalinus-Tonproben ermittelten linearen Ausdehnungskoeffizienten der Schichtung ergaben Werte von 10, 11, 10, 9, 9 und 10×10^{-6} . Sie liegen also im Rahmen der durch CLARK gegebenen Werte für Quarzite, Tonsteine und Kalke.

4.3.4 Wärmeleitfähigkeit

(L. Rybach, Institut für Geophysik der ETH Zürich)

4.3.4.1 Messmethode

Die Wärmeleitfähigkeitsbestimmungen an den Bohrkernen erfolgte mit Hilfe eines QTM-Gerätes («Quick thermal conductivity meter»). Das Messprinzip der Apparatur beruht auf der transienten Methode, welche erlaubt, Messungen in sehr kurzer Zeit auszuführen. Eine Linienquelle (Heizdraht) wird an eine ebene Fläche einer Gesteinsprobe angedrückt, so dass diese mit konstanter Leistung aufgeheizt wird. Ein Thermolement misst die Temperaturzunahme (ca. 10

bis 20°C) in der Mitte des Heizdrahtes; dieser Anstieg erlaubt es, die Wärmeleitfähigkeit der Probe zu bestimmen. Der Messwert ($W/m^{\circ}K$) wird nach ca. 30 sec am Gerät digital angegeben. Die Genauigkeit der Apparatur beträgt 5%, die Reproduzierbarkeit sogar 2% des gemessenen Wertes (nach Angabe des Herstellers).

Eine dünne Folie überdeckt Linienquelle und Thermoelement und erlaubt die Messung von feuchten Proben, da kein eindringendes Wasser die Funktion der Messsonde beeinträchtigen kann. Im übrigen sind Messzeit und Temperaturanstieg derart gering, dass die Gesteinsfeuchtigkeit während der Messung nur unwesentlich beeinflusst wird.

Mit dieser Methode wird nur ein ganz kleines Volumen (einige mm Radius um das Thermoelement) bei der Messung erfasst, so dass die gemessenen Werte stark von kleinräumigen Inhomogenitäten im Bereich des Thermoelements (Klüfte, Einschlüsse, grosse Mineralkörner usw.) abhängen. Die Leitfähigkeit einer Probe kann somit erst durch Mittelung mehrerer Einzelmessungen an verschiedenen Punkten bestimmt werden. Messgerät und Messmethode sind in SCHÄRLI (1980) und im SHOTHERM-Manual eingehend beschrieben.

4.3.4.2 Bestimmung der Anisotropie

Zur Bestimmung der Anisotropie ($K = /K \#$) benötigt man auf der Gesteinsprobe eine Messfläche, welche senkrecht zum Schichtstreichen verläuft. Wird bei der Messung die Linienquelle der Sonde senkrecht zum Schichtverlauf gehalten, so kann $K =$ (Wärmeleitfähigkeit parallel zur Schichtung) direkt bestimmt werden. Die Wärmeleitfähigkeit K_{gs} , gemessen parallel zur Schichtung, erlaubt es, die senkrechte Komponente $K \#$ zu bestimmen:

$$K \# = \frac{K_{gs}^2}{K =}$$

$K \#$ ist in der Regel wichtiger als $K =$, da bei flacher Schichtlagerung der Wärmefluss aus dem Erdinnern weitgehend durch $K \#$ bestimmt wird.

4.3.4.3 Beschreibung der Messungen

Die Kerne wurden unmittelbar nach der Entnahme aus dem Kernrohr auf der Bohrstelle in Plastiksäcke luftfrei eingepackt, gelagert und vor der Messung nur kurz für die Sägearbeiten herausgenommen. So konnte bis zur Messung der bergfeuchte, natürliche Zustand erhalten werden. In einzelnen Fällen war die Verpackung geringfügig beschädigt, und die Proben mussten vor der Messung mit einem Schwamm leicht befeuchtet werden. Da die Kerne der Länge nach gesägt waren, war die zur Anisotropiebestimmung gewünschte Voraussetzung gegeben. Die Raumtemperatur blieb vor und während der Messungen mehr oder weniger konstant, so dass keine grosse Beeinflussung der Messungen durch instationäre Temperaturverhältnisse zu erwarten war, um so mehr, als die Kerne schon seit einigen Wochen vor der Messung im Geologischen Institut der Universität Bern lagerten.

Die Messungen erfolgten auf möglichst grossen, ungestörten Flächen. Damit konnten Störeffekte, bedingt durch die besonders in Tonen und Mergeln auftretenden Risse, weitgehend vermieden werden. Die minimale noch zulässige Probe musste, gemäss Angabe des Herstellers des Gerätes ($1 < K < 3 W/^{\circ}Km$, SHOTHERM), folgende Dimensionen haben:

Länge: 50 mm (parallel zum Heizdraht)

Breite: 30 mm (senkrecht zum Heizdraht)

Tiefe: 15 mm

Das Messprofil wurde in zwei Etappen gemessen; Wiederholungsmessungen haben gezeigt, dass die Resultate aus beiden Messserien durchaus vergleichbar sind.

4.3.4.4 Messresultate und Interpretation

Die Messresultate sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Neben den Werten für $K =$, $K \#$ und Anisotropie sind die Standardabweichungen (Gewichtung $[n-1]$ SP [von $K =$] und SS [von $K \#$])

angegeben. Alle Messwerte entstanden durch Mittelung von mindestens 3 Einzelwerten pro Messrichtung. Während in gewissen Formationen die Werte wenig schwanken (z. B. Opalinus-Ton, Obtusus-Tone), sind die Variationen in anderen erheblich (z. B. Posidonienschiefer, Gipskeuper, Obere Sulfatschichten). Die grossen Schwankungen sind vor allem auf die starken lithologischen Inhomogenitäten zurückzuführen. Sie sind besonders ausgeprägt bei gleichzeitigem Auftreten von Mineralien mit stark unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit, wie z. B. Anhydrit und Ton (Gipskeuper und Obere Sulfatschichten).

In Tabelle 8 sind die berechneten Mittelwerte für die einzelnen Formationen zusammengestellt.

In Tabelle 9 wurde die Tiefenabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit bzw. deren Anisotropie untersucht. Dabei zeigt es sich, dass besonders die tonhaltigen Formationen eine deutliche Tendenz aufweisen. Jedoch lassen sich aufgrund der wenigen verfügbaren Daten noch keine endgültigen Beziehungen ermitteln (die Korrelationskoeffizienten für die durchgeführten Regressionsrechnungen überstiegen nur in den wenigsten Fällen 0,5). Wo in Tabelle 9 keine Werte angegeben sind, waren entweder zu wenig Datenpunkte vorhanden (4), oder es liess sich keine signifikante Tiefenabhängigkeit ermitteln.

Die Triasgesteine unterhalb etwa 130 m Bohrtiefe zeichnen sich allgemein durch signifikant höhere Wärmeleitfähigkeit aus als die darüberliegenden Formationen. Opalinus-Ton und Insektenmergel sind durch ausgeprägte Anisotropie charakterisiert.

5. Anorganisch-geochemische Untersuchungen an Bohrkernen

(Tj. Peters, Mineralogisch-Petrographisches Institut der Universität Bern)

5.1 Hauptelemente

5.1.1 Methodik

Die Hauptelemente SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , K_2O , MnO , TiO_2 , P_2O_5 , Na_2O , Cr_2O_3 und NiO wurden an geglühten Proben mit der Röntgenfluoreszenzmethode bestimmt. Es wurden mit Li-tetraborat hergestellte Schmelzpillen verwendet. Die Resultate der Analysen sind in Tabelle 10 für die Opalinus-Tonproben und in Tabelle 11 für die restlichen Proben zusammengestellt. Hier bedeutet GV der Glühverlust vor der Herstellung der Pillen. Der totale Kohlenstoff-Gehalt, die Anteile an H und an N wurden gaschromatographisch, die CO_2 - und S-Gehalte coulometrisch bestimmt. Der organische Kohlenstoff wurde als Differenz $C_{\text{org}} = C_{\text{tot}} - C_{\text{an CO}_2}$ gebunden ermittelt. An einer grossen Zahl von zusätzlichen Einzelproben wurden nur die C_{tot} , C_{carbonat} , C_{org} , S- und N-Gehalte bestimmt (Tabelle 12).

5.1.2 Ergebnisse

Bei den Opalinus-Tonproben stellt man generell eine Abnahme des SiO_2 -Gehalts mit der Tiefe fest. Diese Abnahme kann mit der Zunahme des Tongehalts (Tabelle 5) korreliert werden. Die Zunahme des Tongehalts ist aber noch deutlicher aus den mit zunehmender Tiefe höher wer-

denden Al_2O_3 - und K_2O -Gehalten ersichtlich. Auch dürfte der Verlauf des MgO -Gehaltes und, was nicht ohne weiteres zu erwarten ist, der TiO -Gehalte mit dem Anteil an Tonmineralien zusammenhängen. Die CaO -Gehalte können direkt mit dem Calcit-Anteil korreliert werden. Der Na_2O -Gehalt variiert wenig, da sowohl Na_2O in den Tonmineralien (z. T. austauschbar) als auch in Albit, der eher in den gröberen Fraktionen angereichert ist, auftritt.

Bei den Proben aus dem Lias und den Oberen bunten Mergeln wird die Geochemie der Hauptelemente vor allem durch die Mengen an Calcit und Dolomit beeinflusst. Erst in zweiter Linie macht sich die Variation im Tonanteil in den Analysenwerten bemerkbar. Die bei den Opalinus-Tonproben festgestellten Korrelationen gelten aber durchaus auch für den Lias und die Keuperproben.

Der Gehalt an organischem Kohlenstoff (y) nimmt im Opalinus-Ton mit der Tiefe (x) linear zu, wobei $y = 0,42 + 0,006 \times x$ beträgt ($r = 0,67$). Der Minimalwert ist 0,42%, der Maximalwert 0,92%. Sehr hohe Gehalte mit einem Maximalwert von 9,13% sind typisch für die Posidonien-schiefer. Während die übrigen Schichtglieder des Lias ähnliche Werte wie der Opalinus-Ton aufweisen, ist der C_{org} -Gehalt im obersten Keuper ausserordentlich niedrig (siehe auch Beilage 3).

5.2 Kationenaustausch

Zu der im Forschungslabor der Zürcher Ziegeleien erfolgten Bestimmung der Kationenaustausch-Kapazität und der Art der in den Proben vorhandenen austauschbaren Kationen wurde die Belegung mit Ba^{2+} -Ionen aus BaCl_2 -Lösung verwendet. Hierbei wird der pH mit Triäthanolamin auf pH 8,6 gepuffert. Diese Methode hat gegenüber der Belegung mit Ammonium den Vorteil, dass kein Ca^{2+} und Mg^{2+} der Karbonate gelöst wird. Die ausgetauschten Kationen K^+ , Na^+ , Mg^{2+} und Ca^{2+} werden ausschliesslich mit Atomsorption bestimmt.

Für den Opalinus-Ton zeigen die in Tabelle 13 zusammengestellten Daten für die totale Umtauschkapazität keine einheitlichen Werte. Den Grossteil der Umtauschkapazität liefert Illit und die Illit/Montmorillonit-Wechselagerung. Berücksichtigt man den Anteil dieser Mineralien in der Gesamtprobe, so ist die Umtauschkapazität des Illits ziemlich hoch. Betrachtet man die Ionenbelegung, so fällt der hohe Anteil an Na^+ vor allem in den untersten Schichten auf. Die Möglichkeit, dass das Na^+ bei der Bestimmung aus Albit gelöst wurde, ist kaum wahrscheinlich, da die obersten Proben am meisten Albit, aber am wenigsten austauschbares Na^+ enthalten. Die Proben im obersten Teil des Opalinus-Tons enthalten dafür mehr austauschbares Ca^{2+} .

Die Umtauschkapazität der Posidonien-schiefer und Obtusus-Tone ist grösser als bei den Opalinus-Ton-Proben, was auf den höheren Illit-Anteil zurückzuführen ist. Im Vergleich zum Opalinus-Ton ist die Belegung mit Ca^{2+} stärker und mit Na^+ schwächer. Der hohe Anteil an organischem Material der Probe 74,20–74,37 m scheint keinen wesentlichen Beitrag an die Umtauschkapazität zu liefern. Bei den Proben der Oberen bunten Mergel ist die Austauschkapazität gesamthaft etwas niedriger, aber bezogen auf den Illit-Gehalt gleich wie in den höheren Formationen. Der Anteil von Na^+ an der Ionenbelegung ist wiederum ziemlich hoch.

Die Probe aus den Unteren bunten Mergeln hat trotz des hohen Dolomitgehalts noch eine recht hohe Austauschkapazität, was wiederum mit dem Vorherrschen von Illit in der Tonfraktion zusammenhängt.

Im Gipskeuper sind die Austauschkapazitäten trotz des geringen Tonanteils ($\pm 40\%$) beachtlich. Hier liefert Corrensit neben Illit einen grossen Anteil der Austauschkapazität. Der hohe Anteil an Na^+ wie auch an Mg^{2+} fällt auf. Dies ist bei den evaporitischen Ablagerungsbedingungen weiter nicht verwunderlich, braucht es doch für die Bildung von Corrensit Gewässer, die stark an Mg^{2+} übersättigt sind.

Bei der Mergelprobe aus den Oberen Sulfatschichten der «Anhydritgruppe» ist der Kationenaustausch z. T. an Illit, z. T. aber auch an Montmorillonit gebunden. Bei dieser Probe überwiegt Ca^{2+} als austauschbares Kation.

5.3 Radiometrische Bestimmung der Uran-, Thorium- und Kalium-Gehalte

(L. Rybach, Institut für Geophysik der ETH Zürich)

5.3.1 Methodik

Die Gehalte an den natürlichen Radioisotopen U, Th und K wurden am Institut für Geophysik der ETH Zürich mittels Gammaskpektrometrie bestimmt. Die spektrometrischen Messungen erfolgten an pulverisierten Gesteinsproben von je etwa 500 g mit einem Mehrkanalanalysator (1024 Kanäle). Die Messzeit betrug je Probe 4×10^4 sec, die damit erreichbare Messgenauigkeit rund $\pm 2\%$. Mit einem Computerprogramm (RYBACH 1971) wurden die Radioelementgehalte aus den gemessenen Gammaskpektren berechnet.

5.3.2 Ergebnisse

Die gefundenen Radioelementgehalte sind in der Tabelle 14 und Beilage 3 aufgeführt. Die gemessenen U-, Th- und K-Werte sind durchwegs niedrig, wie dies für Sedimentgesteine typisch ist (RYBACH 1976); jedenfalls sind sie vergleichbar oder sogar niedriger als in Kristallingesteinen mit intermediärem Chemismus. Diese Feststellung gilt insbesondere auch für den Opalinus-Ton.

Aus dem Integral der Gammaskpektren und mit der Annahme von Eichspektren von K, U und Th lassen sich die einzelnen Gammastrahlungs-Anteile dieser Radioelemente berechnen. Die Resultate sind in Beilage 3 aufgetragen. Auffallend ist die Übereinstimmung der integralen Gamma-Aktivität (= Länge der Balken in Beilage 3; unterteilt entsprechend den K-, U- und Th-Strahlungsanteilen) mit dem Gamma-Log.

Die gewählte Darstellungsart erlaubt eine differenzierte Betrachtung der Zusammenhänge. So ist z. B. die kontinuierliche Zunahme der Radioaktivität des Opalinus-Tons mit der Tiefe (Gamma-Log) dadurch bedingt, dass alle Radioelementgehalte nach unten zunehmen. Generell lässt sich feststellen, dass Uran hier den kleinsten Beitrag zur Gesamtaktivität leistet. Die deutlich höhere Radioaktivität der Unteren bunten Mergel als die der Oberen bunten Mergel ist bedingt durch die rund doppelt so hohen Kalium-Gehalte. Der dazwischenliegende Gansinger-Dolomit zeichnet sich durch recht niedrige Radioaktivität aus (besonders niedrig ist der Th-Gehalt). Der Schilfsandstein zeigt von oben nach unten graduell abnehmende Radioaktivität. Die Radioaktivität des Gipskeuper dagegen ist, wie das Gamma-Log zeigt, recht unterschiedlich. Im Trigonodus-Dolomit ist die Gamma-Aktivität recht niedrig, wobei interessanterweise Uran nach wie vor Gehalte um 1–2 ppm aufweist, bei z. T. sehr niedrigen K-Gehalten. Die Dominanz des U ist auch für die darunterliegenden Schichten charakteristisch; in der «Anhydritgruppe» wurden z. T. sehr niedrige Gamma-Aktivitäten festgestellt mit Radioelementgehalten, wie sie mit solch niedrigen Werten sonst nur in ultrabasischen Gesteinen zu finden sind.

Es wurde zudem noch versucht, die im Gamma-Log sichtbaren «Marker-Horizonte» (= starke Peaks) im Kernmaterial zu erfassen. Die Entnahme von entsprechenden Proben war indessen recht schwierig: die «anormalen» Stellen konnten in den Bohrkernen weder von Auge noch mit einem Szintillometer identifiziert werden. Vermutlich sind solche «Marker»-Lagen an Kluftfüllungen gebunden, die beim Bohrvorgang leicht ausgespült werden. Es liessen sich immerhin drei solche «Peaks» erfassen:

- Bohrmeter 75,91–75,95 m (Amaltheenschichten und Numismalisschichten):
1,40% K, 10,9 ppm U, 7,4 ppm Th
- Bohrmeter 131,85 (Gipskeuper):
4,91% K, 13,0 ppm U, 12,2 ppm Th
- Bohrmeter 219,74 m (Lettenkohle):
6,82% K, 2,8 ppm U, 6,5 ppm Th

Der Kalium-Gehalt der Lettenkohlenprobe ist wegen des hohen Kalifeldspatgehalts erstaunlich hoch.

Tabelle 5: Röntgenographisch bestimmter Mineralgehalt der Gesamtproben in Gew.-%

Probe Tiefe in m	Geologische Formation	Quarz	Albit	K-Feldspat	Calcit	Dolomit Ankerit drit	Gips	Org. Subst.	Tm + Akz Oz	Probe Tiefe in m	Geologische Formation	Quarz	Albit	K-Feldspat	Calcit	Dolomit Ankerit drit	Gips	Org. Subst.	Tm + Akz Oz	
24,00-27,68	Opalinus-Ton	28	5	5	13	1		0,5-1	47	110,40-110,43	Untere bunte Mergel	18	7	-	-	1-2		0,04	74	
27,68-31,04		24	2	-	10	1-2		0,5-1	62	114,12-114,20		17	5	5	-	9		0,03	64	
31,04-34,90		25	2	1-2	11	1-2		0,5	58										0,03	38
34,90-38,61		22	2	1-2	8	1-2		0,5-6	64										-	52
38,61-42,38		17	0	-	10	-		1	71	114,96-115,19		37	10	12	10	1-2	1-2		0,07	42
42,38-46,15		20	2	-	10	1-2		0,5	66	116,40-116,50		35	11	8	11	1-2	2		0,04	26
46,15-49,91		18	1-2	-	9	-		0,5-1	71	120,37-120,39		33	10	15	10	1-2	20		0,12	36
49,91-53,65		14	1	-	8	-		0,5	76	120,57-120,75		40	11	13	11	1-2	-		0,30	61
53,65-57,04		10	0-1	-	10	-		0,5-1	79	125,28-125,43		10	0-5	-	1	38	27		0,20	50
57,04-60,25		15	1-2	-	9	-		0,5	74	126,30-126,34		11	sp	-	1	41	41		0,03	74
60,25-63,98	12	1-2	-	11	0-1		0,5-1	74	130,92-131,00	6			-	5	2		0,05	10		
63,98-65,73	15	1-2	-	8	0-1		1	74	150,25-150,40	11			-	0-1	12		0,04	13		
66,69-66,82	Jurensis-Mergel	5	-	-	40	28		0,5	26	156,72-156,80	3	-	-	-	13	20		0,10	58	
68,27-68,33		7	0-1	-	38	9		0,5	45	159,00-159,17	4-5	-	-	-	5	83		0,05	10	
69,25-69,32		9	0-1	-	27	3		4,5	55,5	172,65-172,86	2	-	-	-	2	97		0,04	13	
71,32-71,55		10	2	-	34	6		4	44	188,50-188,59	4	-	-	-	1	5		-	35	
74,20-74,37		11	2	-	24	4		9	50	190,05-190,10	1	-	-	-	0-1	12		-	40	
77,58-77,75		Obtusus-Tone	47	2	3	5	1-2		0,5	41	212,78-212,85	12	-	5	5	0-5	5		0,50	36
80,32-80,53			32	1	6	3	34		1-2	22	217,04-217,12	13	-	35	4	5-6		0,30	42	
82,95-83,14			34	1-2	1-2	7	1-2		1	53	219,74-219,81	14	-	20	5	4-5		0,10	56	
88,70-88,90			26	1-2	-	7	3		0,5-1	62	202,50-202,55	4	-	-	-	0-1	12		0,10	71
92,51-92,67		Insektenmergel	18	-	-	8	1-2		0,5	72	222,81-222,90	4	-	-	-	94			0,80	2
97,09-97,18	19		0-1	-	-	11		0,4	69	229,60-229,70	1	-	-	-	97		0,20	2		
98,32-98,37	15		-	-	1	2		0,5	81	257,06-257,10	6	-	-	-	31		-	-	28	
98,60-98,64	7		-	-	-	-	65		37	303,01-303,05	10	4-5	-	-	11	32		0,10	42	
99,45-99,50	Obere bunte Mergel	11	1-2	-	-	31		0,06	56	311,13-311,20	7	-	-	-	1	46		0,70	42	
100,46-100,66		18	4	6	-	45		-	27					-	-		-	-	42	
103,37-103,42		12	-	-	-	51		0,10	37					-	-		-	-	6,0	
104,95-105,05		12	5	1-2	-	-	54		27					-	-		-	-	6,0	

Legende

Tm + Akz = Tonmineralien + Akzessorien

TM / Oz = Verhältnis Tonmineralien / Quarz

- = bestimmt aber unter Nachweisbargrenze

Tabelle 6: Röntgenographisch bestimmte Tonmineralverhältnisse in der dekarbonatisierten Fraktion < 2 Micron in %

Probe Tiefe in m	Geologische Formation	Illit	Kaolinit	Wechsel-lagerung Illit/Montmorillonit	Corrensit	Chlorit	IK	002/001	Probe Tiefe in m	Geologische Formation	Illit	Kaolinit	Wechsel-lagerung Illit/Montmorillonit	Corrensit	Chlorit	IK	002/001
24,00- 27,68	Opalinus-Ton	35-40	40-45	5-10	-	10-15	7	0,38	110,40-110,43	Untere bunte Mergel	85	-	-	-	15	9	0,33
27,68- 31,04		35-40	30-35	15-20	-	10-15	12	0,46	114,12-114,20		85	5-10	-	5-10	9	9	0,38
31,04- 34,90		40	35-40	5-10	-	10-15	9	0,49	114,96-115,19	Schilfsandstein	65-70	20	5	15	6	0,32	
34,90- 38,61		40	35-40	10	-	10-15	8	0,51	116,40-116,50		60	20	0-5	20	6	0,39	
38,61- 42,38		35-40	35-40	10	-	15	8	0,59	120,37-120,39		60	15	5-10	15	6	0,47	
42,38- 46,15		40	25-30	15-20	-	10-15	15	0,51	120,57-120,75		30-35	30-35	-	30-35	6	0,43	
46,15- 49,91		40-45	30	15	-	10-15	11	0,49	125,28-125,43		40	30	-	30	6	0,41	
49,91- 53,65		40-45	30-35	10-15	-	10-15	8	0,59	126,30-126,34		65-70	30-35	-	-	3	0,28	
53,65- 57,04		40	25-30	15	-	10-15	13	0,49	130,92-131,00		95-100	-	-	20-25	5-10	7	0,29
57,04- 60,25		40	35-40	10	-	10-15	7	0,55	135,72-135,80		70	-	-	5-10	6-7	0,35	
60,25- 63,98		40-45	35	10	-	10-15	9	0,51	142,27-142,32		50	-	-	40-50	6	0,33	
63,98- 65,73		40	30-35	10-15	-	10-15	7	0,58									
66,69- 66,82	Jurensis-Mergel	40-50	30-35	10	-	15	11	0,28	150,25-150,40	Gipskeuper	65	-	-	30	5	5	0,42
68,27- 68,33		50	25-30	5-10	-	10-15	11	0,45	156,72-156,80		40	-	-	55-60	5	7	0,26
69,25- 69,32	Posidonien-schiefer	50-55	25-30	5	-	10-15	8	0,45	159,00-159,17		45-50	-	-	40-45	10	6	0,51
71,32- 71,55		60	20-25	5-10	-	10-15	8	0,38	172,65-172,86		35	-	-	55-60	5-10	4	0,35
74,20- 74,37		55	20-25	10-15	-	10	9	0,37	188,50-188,59		30	-	-	60	10	6	0,38
77,58- 77,75	Obtusus-Tone	40-45	35-40	10	-	10	11	0,43	202,50-202,55		45	-	-	45	10	8	0,37
80,32- 80,53		45	30	10-15	-	10-15	12	0,49	209,29-209,38		40	-	-	50	10	7	0,42
82,99- 83,14		45	25-30	10-15	-	15	14	0,44	212,78-212,85	Lettenkohle	85	10-15	-	-	0-5	9	0,42
88,70- 88,90		50	20	10	-	20	11	0,50	217,04-217,12		70-75	25-30	-	-	6-7	0,64	
92,51- 92,67	Insekten-mergel	50-55	20	15	-	10-15	15	0,53	219,74-219,81		75-80	20-25	-	-	-	7	0,39
97,09- 97,18		50-55	25	5-10	-	10-15	20	0,65	222,81-222,90	Tigonodus-Dolomit	60	20	-	-	20	6-7	
98,32- 98,37		55-60	20-25	10	-	10	18	0,43	229,60-229,70		95	-	-	-	5	6	0,47
98,60- 98,64	Obere bunte Mergel	70-75	-	25-30	-	2-5	23	0,37	257,06-257,10	Plattenkalk	85-90	10-15	-	-	-	6-7	0,33
99,45- 99,50		70	-	20-25	-	5	16	0,35	303,01-303,05	"Anhydrit-gruppe"	65-70	-	-	-	15-20	5	0,32
100,46-100,66		75	-	20-25	-	2-5	21	0,34	311,13-311,20		20-25	-	-	70	5	4	0,29
103,37-103,42		80	-	20	-	2-5	16	0,31									
104,95-105,05		70	-	25-30	-	2-5	32	0,32									

Legende

IK = Illit Kristallinität, 002/001 = Verhältnis der Basisreflexe von Illit

- = bestimmt aber unter Nachweisbarkeitsgrenze

M = reiner Montmorillonit

Tabelle 7: Wärmeleitfähigkeitsbestimmungen

Tiefe (m)	K=	K#	A	SP	SS	Formation	Lithologie	Tiefe (m)	K=	K#	A	SP	SS	Formation	Lithologie
25,40	2,36	1,54	1,54	0,28	0,47	Opalinus-Ton	Ton	97,90	2,27	1,10	2,07	0,20	0,18		Ton, siltig
25,50	1,92	1,36	1,41	0,13	0,14		Ton	98,10	2,28	1,01	2,14	0,11	0,14		Ton, siltig
28,80	2,27	1,35	1,68	0,04	0,09		Ton	98,70	2,05	2,14	0,96	0,07	0,20	Obere bunte Mergel	Mergel, dolom.
28,90	2,31	1,16	1,99	0,23	0,30		Ton	98,90	2,31	2,14	1,08	0,23	0,53		Mergel, dolom.
30,24	2,71	2,24	1,21	0,03	0,26		Ton	99,70	2,39	2,14	1,12	0,27	0,59		Mergel, dolom.
30,60	2,72	1,72	1,58	0,42	0,42		Ton	100,70	2,29	2,29	1,00	0,22	0,48		Mergel, dolom.
32,40	2,53	1,93	1,32	0,07	0,15		Ton	106,60	3,07	3,26	0,94	0,13	0,60	Gansinger-Dolomit mit Breccie	Dolomit/Ton
32,85	2,11	1,71	1,24	0,29	0,15		Ton								
37,20	2,21	1,22	1,81	0,19	0,18		Ton	114,90	2,18	2,49	0,88	0,21	0,48	Untere bunte Mergel	Ton, siltig
37,60	2,29	1,21	1,89	0,16	0,15		Ton								
37,70	2,30	1,71	1,34	0,38	0,54		Ton								
37,95	2,55	1,68	1,51	0,39	0,37		Ton								
38,10	2,31	1,22	1,88	0,19	0,18		Ton								
38,30	2,41	1,45	1,66	0,19	0,29		Ton								
42,68	2,34	1,50	1,56	0,07	0,13		Ton								
42,06	2,41	1,84	1,31	0,24	0,32		Ton	117,60	2,29	2,30	1,00	0,13	0,93	Schilfsandstein	Sandstein
42,65	2,18	1,43	1,53	0,20	0,31		Ton	122,70	2,81	2,68	1,05	0,18	0,65		Sandstein
43,98	2,20	1,73	1,27	0,14	0,25		Ton	129,00	3,34	2,81	1,19	0,52	1,20		Ton, schwarz
46,20	2,49	1,22	2,04	0,14	0,17		Ton								
46,65	2,53	1,24	2,05	0,11	0,16		Ton	134,10	3,66	3,89	0,94	0,37	1,16	Gipskeuper	Anhydrit (Ton)
49,80	2,52	1,16	2,17	0,04	0,12		Ton	138,00	3,89	5,00	0,78	0,32	2,14		Ton (Anhydrit/Gips)
53,68	2,52	1,03	2,45	0,10	0,13		Ton	142,20	3,02	3,01	1,00	1,08	3,54		Ton (Anhydrit)
56,95	2,25	1,15	1,96	0,27	0,30		Ton	146,00	4,48	2,31	1,94	1,20	1,79		Ton (Anhydrit)
62,00	2,48	1,05	2,36	0,16	0,13		Ton	150,50	6,15	4,46	1,38	1,04	1,71		Ton (Anhydrit)
65,60	2,36	1,25	1,89	0,15	0,25		Ton	154,90	3,69	2,93	1,26	1,18	1,34		Tonmergel (Anhydrit)
64,12	2,29	1,18	1,94	0,21	0,25		Ton	156,60	6,26	4,43	1,41	1,66	4,07		Anhydrit (Ton)
66,25	2,08	2,11	0,99	0,17	0,29	Jurensis-Mergel	Mergel, hart	189,35	5,45	5,40	1,01	0,78	2,27		Anhydrit (Ton)
69,00	2,33	2,45	0,95	0,17	0,41		Kalk, mergelig	192,60	3,97	4,61	0,86	1,00	2,29		Ton (Anhydrit/Gips)
69,58	1,91	1,61	1,18	0,13	0,32	Posidonien-schiefer	Kalk, mergelig	206,10	5,27	7,75	0,68	0,25	4,34		Anhydrit (Ton)
70,87	1,92	1,47	1,31	0,05	0,23		Kalkmergel	210,95	5,86	6,41	0,91	0,61	1,93		Anhydrit (Ton)
74,20	1,43	0,95	1,50	0,08	0,26		Mergel, bitum.	217,65	4,88	4,65	1,05	0,55	1,28	Lettenkohle	Dolomit
74,60	2,73	2,91	0,94	0,13	0,49		Mergel, kalkig								
76,16	2,30	2,54	0,91	0,24	0,47	Analthenssch. bis Numismalis-Schichten	Kalk, mergelig	223,00	3,70	3,75	0,99	0,52	1,16	Trigonodus-Dolomit	Dolomit, porös
76,16	2,56	2,43	1,06	0,10	0,32		Kalk, mergelig	237,20	5,30	4,68	1,13	0,48	1,00		Dolomit
76,16	2,32	2,32	1,00	0,12	0,34		Kalk, mergelig	244,40	4,74	3,72	1,27	0,34	1,31		Dolomit
77,50	2,14	1,61	1,33	0,10	0,39	Obtusus-Tone	Kalkmergel	253,70	4,37	3,38	1,30	0,71	1,46		Dolomit
77,50	2,41	1,87	1,29	0,13	0,16		Kalkmergel	259,30	3,13	2,21	1,41	0,45	0,49	Plattenkalk	Kalk, dolomit.
77,70	2,40	2,50	0,96	0,08	0,23		Kalkmergel	265,30	3,02	2,77	1,09	0,27	0,46		Kalk
77,70	2,76	2,50	1,10	0,39	0,61		Kalkmergel								
79,04	2,74	1,17	1,17	0,05	0,42		Kalkmergel	274,90	3,21	2,94	1,09	0,18	0,20	Trochitenkalk	Kalk, dicht
81,60	2,57	1,70	1,51	0,08	0,33		Mergel, siltig	279,15	3,07	3,57	0,86	0,07	1,28		Kalk, dicht
82,00	2,67	1,63	1,64	0,14	0,17		Mergel, siltig	284,20	3,15	3,14	1,01	0,14	0,39		Kalk
84,80	2,52	1,63	1,54	0,21	0,37		Mergel, tonig	291,10	3,93	3,55	1,11	0,23	0,91		Kalk, mergelig porös
87,25	2,59	1,71	1,71	0,16	0,24		Mergel, tonig	295,25	3,43	3,69	0,93	0,25	0,55	Dolomit der Anhydritgruppe	Dolomit (Anhydrit.)
90,10	1,95	1,84	1,06	0,08	0,10	Arietenkalk	Mergel, tonig	300,00	3,30	6,39	0,52	0,44	2,37		Dolomit, porös
90,97	2,07	1,79	1,16	0,13	0,26		Kalk, hart								
90,97	1,81	1,43	1,27	0,04	0,13		Kalk, hart								
91,10	2,05	2,12	0,97	0,05	0,17		Kalk, hart								
91,10	2,22	2,01	1,10	0,07	0,20		Kalk, hart								
95,45	2,37	1,15	2,05	0,14	0,38	Insektonmergel	Mergel, siltig	306,70	3,51	3,56	0,98	0,20	0,55	Obere Sulfat-schichten der Anhydritgruppe	Dolomit
96,10	2,26	1,21	1,87	0,07	0,21		Mergel, siltig	308,50	4,06	4,70	0,86	0,36	0,82		Gips (Ton)
97,47	2,39	1,23	1,94	0,17	0,21		Ton, siltig	313,40	5,28	4,77	1,11	0,28	0,80		Anhydrit
								317,00							

K= Wärmeleitfähigkeit parallel zur Schichtung der Probe gemessen
 K# Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Schichtung der Probe gemessen
 A Anisotropie-Faktor, A = K#/K#
 SP Standardabweichung (-) von K=
 SS Standardabweichung (+) von K#

Tabelle 8: Mittelwerte der Wärmeleitfähigkeit für die Formationen

Formation	K=	dK=	K#	dK#	A	dA	Anzahl Messungen
Opalinus-Ton	2,37	0,04	1,43	0,06	1,72	0,07	26
Jurensis-Mergel	2,21	0,12	2,28	0,25	0,97	0,12	2
Posidonienschiefer	2,00	0,05	1,74	0,17	1,23	0,12	4
Amaltheenschichten bis Numismalis-Schichten	2,39	0,10	2,43	0,22	0,99	0,10	3
Obtusus-Tone	2,48	0,05	1,92	0,11	1,33	0,08	10
Arietenkalk	2,04	0,04	1,84	0,10	1,13	0,06	4
Insektenmergel	2,31	0,06	1,14	0,11	2,01	0,20	5
Obere bunte Mergel	2,27	0,10	2,20	0,21	1,03	0,11	5
Gansinger-Dolomit	3,07	0,13	3,26	0,60	0,94	0,18	1
Untere bunte Mergel	2,18	0,21	2,49	0,48	0,88	0,19	1
Schilfsandstein	2,81	0,11	2,59	0,57	1,08	0,24	3
Gipskeuper	4,59	0,27	4,42	0,73	1,11	0,24	11
Lettenkohle	4,88	0,55	4,65	1,28	1,05	0,31	1
oberer Muschelkalk	3,76	0,12	3,37	0,31	1,13	0,11	10
Obere Sulfatschichten der "Anhydritgruppe"	3,55	0,12	4,07	0,45	0,96	0,11	6

Legende

dK=, dK#: Standardabweichungen der Mittelwerte

Tabelle 9: Untersuchung der Tiefenabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit (z[m])

Formation	K=		K#		A		Anzahl Messwerte
	Steig.	Absch.	Steig.	Absch.	Steig.	Absch.	
Opalinus-Ton	-	-	-0,01	1,59	0,01	1,51	26
Posidonienschiefer	0,05	-1,77	-	-	0,66	0,97	4
Obtusus-Tone	-0,02	3,99	-0,07	2,00	0,66	0,97	10
Arietenkalk	?	?	-	-	-0,10	1,28	4
Insektenmergel	-0,01	3,73	-	-	0,02	1,96	5
Obere bunte Mergel	0,06	-4,00	-	-	-0,02	1,04	5
Gipskeuper	0,02	1,22	0,01	4,22	-	-	12
oberer Muschelkalk	-0,02	8,98?	0,13	3,07	-0,27	0,31?	10
Obere Sulfatschichten der "Anhydritgruppe"	0,06	-15,94	0,01	3,76	-0,04	1,09	6

Legende:

Steig.: Steigung der Regressionsgerade

Absch.: Ordinatenabschnitt der Regressionsgerade

Tabelle 10: Chemische Analysen von Durchschnittsproben von Opalinus-Ton über jeweils ca. 4 m in Gew.-%

Tiefe in Meter	24,00 bis 27,68	27,68 bis 31,04	31,04 bis 34,90	31,90 bis 38,61	38,61 bis 42,38	42,38 bis 46,15	46,15 bis 49,91	49,91 bis 53,65	53,65 bis 57,04	57,04 bis 60,25	60,25 bis 63,98	63,98 bis 65,73
SiO ₂	52,17	55,09	55,93	53,46	52,90	52,25	52,06	49,79	46,38	49,34	49,38	50,73
Al ₂ O ₃	15,62	15,55	15,22	17,34	18,41	18,16	19,11	20,61	21,02	19,96	20,18	20,64
Fe ₂ O ₃	2,59	2,81	2,52	1,36	2,60	2,23	2,71	2,81	3,08	3,59	2,57	3,21
FeO	2,60	2,47	2,80	4,39	3,67	4,01	3,51	4,15	3,44	2,98	3,26	2,01
MgO	1,86	1,83	1,73	2,06	2,14	2,11	2,25	2,44	2,38	2,28	2,36	2,23
CaO	7,66	6,06	5,61	4,12	3,66	4,14	3,68	2,82	4,60	4,68	4,99	4,42
K ₂ O	2,45	2,54	2,49	2,76	2,88	2,87	2,97	3,13	3,11	3,15	3,17	3,31
MnO	0,07	0,07	0,07	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,07	0,08	0,06	0,05
TiO ₂	0,85	0,89	0,89	0,96	0,99	0,98	1,01	1,02	0,95	0,99	1,00	1,02
P ₂ O ₅	0,31	0,28	0,27	0,29	0,29	0,28	0,28	0,28	0,29	0,27	0,28	0,27
Na ₂ O	0,47	0,47	0,58	0,48	0,53	0,55	0,71	0,55	0,68	0,53	0,60	0,52
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
NiO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01
H ₂ O+	3,30	4,80	4,30	5,80	5,40	5,40	5,85	6,66	5,85	5,60	5,87	6,13
CO ₂	6,43	5,28	5,38	4,45	4,36	5,10	4,08	4,02	4,65	4,11	5,03	3,77
C _{org}	0,76	0,63	0,48	0,63	1,00	0,52	0,71	0,56	0,74	0,53	0,79	0,94
S	0,64	0,32	0,46	0,16	0,17	0,21	0,34	0,34	0,75	0,99	0,49	0,54
N	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,06	-	0,06
Summe	97,85	99,23	98,80	98,43	99,18	98,98	99,45	99,36	98,08	99,14	100,04	99,86
GV	11,94	11,16	10,76	10,82	11,11	11,33	11,12	11,62	12,08	11,10	11,85	11,35

Legende

GV = Gewichtsverlust nach Brennen bei 1000°C

- = bestimmt aber unter Nachweisbarkeitsgrenze

Tabelle 11: Chemische Analysen von Lias- und Triasproben

Tiefe in Meter	Jurensis-Mergel		Posidonienschiefer		Obtusus-Tone			Insektenmergel	Obere bunte Mergel		Untere bunte Mergel	Schilfsandstein	Gipskeuper	Lettenkohle	Ob. Sulfatsch. d. "Anhydritgr." (Mergel)
	71,32 bis 71,55	74,20 bis 74,37	77,58 bis 77,75	80,33 bis 80,53	82,99 bis 83,14	88,70 bis 88,90	92,51 bis 92,67		100,46 bis 100,66	104,95 bis 105,05					
SiO ₂	15,52	25,95	69,62	44,50	61,42	56,01	51,93	36,51	28,42	59,87	36,52	34,21	31,65	31,79	
Al ₂ O ₃	6,69	9,23	10,53	8,94	13,97	14,56	18,32	7,07	6,67	15,80	11,06	7,84	8,58	8,00	
Fe ₂ O ₃	3,42	4,56	3,61	4,92	3,89	5,18	4,87	2,57	2,64	7,56	4,44	3,11	2,70	2,66	
FeO															
MgO	4,33	2,35	1,40	5,61	1,97	2,31	2,23	8,88	11,88	3,07	9,16	14,35	11,65	8,92	
CaO	33,34	23,99	3,30	12,84	3,70	4,91	4,89	14,64	16,69	0,74	10,85	13,57	15,46	17,81	
K ₂ O	0,98	1,91	2,32	1,82	2,87	2,99	3,66	1,93	1,80	5,12	4,21	2,29	3,24	2,66	
MnO	0,15	0,06	0,03	0,14	0,04	0,05	0,07	0,11	0,10	0,04	0,09	0,13	0,05	0,03	
TiO ₂	0,29	0,48	0,87	0,67	0,97	0,95	1,03	0,52	0,40	0,72	0,42	0,32	0,37	0,35	
P ₂ O ₅	0,37	0,34	0,11	0,11	0,17	0,17	0,20	0,05	0,03	0,14	0,14	0,19	0,18	0,12	
Na ₂ O	0,16	0,43	0,40	0,26	0,46	0,50	0,41	0,64	0,56	1,14	0,41	0,41	0,23	0,37	
Cr ₂ O ₃	-	-	-	0,01	-	-	0,01	-	-	-	-	-	-	-	
NiO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
H ₂ O+	2,90	4,50	4,00	3,20	5,90	6,90	8,10	5,30	4,50	4,80	5,16	3,57	2,55	3,54	
CO ₂	30,29	17,81	3,23	16,13	3,55	4,55	4,51	21,32	25,90	0,70	17,70	19,75	22,24	21,62	
C _{org}	0,46	4,13	0,49	1,46	0,98	0,78	0,36	0,01	0,18	0,04	0,20	0,24	0,50	0,12	
S	0,08	2,07	1,24	0,27	0,46	0,33	0,33	0,07	0,04	0,11	0,44	0,30	0,67	0,90	
N	0,02	0,12	0,04	0,03	0,06	0,07	0,08	0,03	0,04						
Summe	99,00	97,93	101,19	100,91	100,41	101,26	101,00	99,65	99,85	99,85	100,80	100,28	100,07	98,89	
GV	33,05	28,54	6,52	19,43	9,60	11,93	12,24	26,32	30,29	5,65	23,06	23,56	25,29	26,06	

Legende

GV = Gewichtsverlust nach Brennen bei 1000 °C
 - = bestimmt aber unter Nachweisbarkeitsgrenze

Tabelle 12: Gehalte an organischem und an CO₂ gebundenem Kohlenstoff, Schwefel, Stickstoff und C_{org}/N-Verhältnisse

Probe Tiefe in m	C _{tot} (%)	C _{org} (%)	CO ₂ (%)	S (%)	N (%)	C _{org} /N	Probe Tiefe in m	C _{tot} (%)	C _{org} (%)	CO ₂ (%)	S (%)	N (%)	C _{org} /N
24,23-24,32	1,84	0,77	3,93		0,09	8,56	74,87-74,88	8,11	6,50	5,92		0,23	28,26
24,87-24,90	1,87	0,42	5,33		0,06	7,00	75,35	8,86	0,53	30,52		-	-
25,70-25,72	1,82	0,59	4,52		0,08	7,38	75,45	10,49	0,87	35,25		0,02	43,50
27,58-27,60	1,65	0,44	4,54		0,07	6,29	75,58	8,16	0,53	25,80		-	-
28,40-28,58	2,11	0,53	5,80		0,08	6,63	75,91-75,99	7,58	0,53	25,80		0,05	10,60
29,39-29,53	2,15	0,67	5,40		0,08	8,38	76,19-76,24	11,31	0,84	38,37		0,02	42,00
30,95-30,97	1,81	0,57	4,53		0,07	8,14	77,58-77,75	1,37	0,32	3,22		0,04	12,25
32,01-32,04	1,93	0,52	5,17		0,07	7,43	78,62-78,67	1,50	0,001	5,50		0,04	0,003
32,57-32,65	1,64	0,57	3,94		0,08	7,13	79,52-79,56	1,56	0,72	3,08		0,06	12,00
33,99-34,00	1,88	0,58	4,78		0,08	7,25	80,33-80,53	5,86	1,46	16,12		0,03	48,67
34,32-34,40	1,83	0,67	4,61		0,07	8,14	81,32-81,33	1,53	0,76	2,82		0,06	12,67
35,18-35,20	1,69	0,50	3,98		0,08	7,50	82,99-83,14	1,95	0,98	3,55		0,06	16,33
35,91-35,98	1,82	0,64	4,34		0,08	8,40	84,00-84,04	1,95	0,79	4,25		0,07	11,29
37,65-37,67	1,74	0,66	3,98		0,08	8,25	85,94-85,97	2,04	0,82	4,47		0,06	13,67
39,13-39,20	1,93	0,67	4,60		0,08	8,38	88,75-88,90	2,02	0,78	4,54		0,07	11,14
40,23-40,24	2,04	0,67	5,02		0,08	8,38	91,74-91,76	1,51	0,70	3,00		0,10	7,00
41,29-41,30	3,03	0,71	8,49		0,08	8,88	92,51-92,67	1,59	0,36	4,51		0,08	4,50
42,37-42,38	2,10	0,75	4,94		0,09	8,33	97,09-97,18	1,95	0,42	5,61		0,07	6,00
43,31-43,32	1,80	0,67	4,16		0,08	8,38	98,32-98,37	0,82	0,47	1,28		0,11	4,27
43,93-44,03	1,95	0,72	4,50		0,08	9,00	98,60-98,64	9,81	0,53	34,00		-	-
45,25-45,32	1,94	0,80	4,17		0,08	10,00	99,45-99,50	4,42	0,06	15,97		0,05	1,20
46,14	2,02	0,68	4,92		0,08	8,50	100,46-100,66	5,88	0,01	21,51		0,03	-
46,73-46,85	1,93	0,67	4,63		0,08	8,38	103,37-103,43	-	0,13	23,78		n. best.	-
48,67-48,70	1,92	0,74	4,32		0,09	8,22	104,95-105,05	7,31	0,18	26,13		0,04	4,50
49,21-49,30	1,54	0,63	3,32		0,08	7,88	104,95-105,05	11,72	0,25	42,03		0,11	4,27
49,80-49,81	2,79	0,66	7,80		0,08	8,25	105,76-105,85	12,67	0,02	45,66		-	-
50,72-50,82	1,79	0,82	3,56		0,09	9,11	106,85-106,93	3,17	0,21	11,54		-	-
51,76-51,77	1,31	0,79	1,90		0,10	7,90	109,55	10,82	0,07	39,39		0,11	0,11
52,55-52,56	1,62	0,70	3,36		0,08	8,75	109,78	0,23	0,04	0,70		0,55	0,55
53,57-53,58	1,55	0,67	3,21		0,09	7,44	110,40-110,43	0,06	-	0,22		-	-
54,20-54,30	1,52	0,71	2,96		0,09	7,89	112,70-112,73	1,28	0,03	4,58		0,09	0,09
56,23-56,24	2,26	0,72	5,65		0,09	8,00	114,12-114,20	0,13	0,03	0,37		0,40	0,40
56,93-56,94	2,14	0,77	5,03		0,09	8,56	114,96-115,19	0,50	-	1,83		0,28	0,28
58,53-58,63	1,86	0,65	4,44		0,09	7,22	116,40-116,50	0,11	0,03	0,28		0,41	0,41
59,27-59,29	1,87	0,69	4,31		0,08	8,63	117,60	0,21	0,07	0,51		0,19	0,19
61,49-61,60	1,89	0,79	4,03		0,09	8,78	120,37-120,39	2,82	0,04	10,19		0,44	0,44
63,96-63,98	2,26	0,92	4,93		0,09	10,22	120,57-120,75	0,04	0,01	0,11		2,45	2,45
64,75-64,95	1,66	0,82	3,07		0,09	9,11	125,28-125,43	10,62	0,26	38,47		0,32	0,32
65,69-65,70	2,97	0,65	8,49		0,09	7,22	125,90-125,98	3,65	0,26	12,42		0,19	0,19
66,69-66,82	8,72	0,46	30,27		0,02	23,00	126,30-126,34	5,84	0,06	21,18		0,66	0,66
68,27-68,33	6,24	0,38	21,47		0,05	7,60	126,34-126,36	10,91	0,33	38,77		0,21	0,21
69,25-69,32	8,16	4,45	13,60		0,16	40,45	126,65-126,76	8,03	0,22	28,62		0,95	0,95
71,32-71,55	8,99	4,13	17,81		0,12	34,42	127,00	7,29	0,21	25,94		0,73	0,73
72,35-72,86	11,54	6,73	17,73		0,17	39,59	128,75-128,80	5,03	0,20	17,70		2,20	2,20
72,89-72,91	5,97	0,12	21,44		0,08	60,75	130,92-131,00	1,25	0,65	2,20		0,32	0,32
73,33-73,36	12,55	4,86	28,18		0,08	60,75	131,85-131,87	7,51	0,29	40,16		0,95	0,95
73,80-73,83	9,77	6,17	13,19		0,17	36,29	134,00-134,04	0,21	0,03	0,66		0,80	0,80
74,14	11,80	2,18	35,25		0,04	54,50	134,90-134,92	0,25	-	0,95		8,10	8,10
74,20-74,37	12,18	9,13	11,18		0,26	35,12	135,72-135,80	0,25	-	0,95		0,95	0,95
74,62-74,67	-	-	39,28		0,03	-	138,75-138,80	11,10	0,08	40,38		0,73	0,73
							139,31-139,35						

Tabelle 12 (Fortsetzung): Gehalte an organischem und an CO₂ gebundenem Kohlenstoff Schwefel, Stickstoff und C_{org}/N-Verhältnisse

Probe Tiefe in m	C _{tot} (%)	C _{org} (%)	CO ₂ (%)	S (%)	N (%)	C _{org} /N	Probe Tiefe in m	C _{tot} (%)	C _{org} (%)	CO ₂ (%)	S (%)	N (%)	C _{org} /N
142,27-142,35	0,21	0,05	0,59	10,79			255,19-255,24	11,99	0,29	42,78			
145,30-145,40	0,18	0,05	0,48	11,17			255,75-255,95	11,09	0,38	39,24			
150,25-150,40	5,63	0,24	19,75	0,30			256,29-256,39	11,40	0,18	41,11			
156,72-156,80	0,14	0,03	0,40	5,28			257,06-257,10	8,34	-	30,56			
159,00-159,17	1,83	0,11	6,30	5,44			258,57-258,78	12,31	0,29	44,04			
172,65-172,86	0,64	0,05	2,16	19,62			259,22-259,27	11,99	0,12	43,49			
181,27-181,35	1,23	0,06	4,27	7,62			259,41-259,52	11,91	0,21	42,87			
181,35-181,37	0,62	-	2,27	3,95			261,85	7,49	0,37	26,09			
181,55	0,03	-	0,11	22,35			262,39-262,46	11,17	-	40,93			
184,05-184,10	0,01	-	0,05	21,12			263,82-263,88	11,65	0,33	41,48			
188,50-188,59	0,25	0,04	0,70	24,98			266,21-266,26	12,04	0,42	42,58			
189,21-189,28	9,77	0,05	35,62	3,87			269,02-269,05	11,94	0,32	42,58	0,51		
190,05-190,10	0,79	0,10	2,53	7,82			270,80-270,85	11,87	0,23	42,65			
193,00-193,15	0,89	-	3,26	11,21			271,81-271,86	11,30	0,21	40,64			
202,50-202,55	2,45	-	8,98	11,46			274,90-274,92	11,96	0,19	43,13			
209,29-209,38	1,15	-	4,21	12,49			275,40-275,48	12,05	0,16	43,57			
210,77-210,81	1,09	0,01	3,96	20,37			278,66-278,70	11,49	0,42	40,93			
212,78-212,85	6,57	0,50	22,24	0,67			280,68-280,80	11,19	0,42	39,46	0,46		
213,55-213,60	9,31	0,30	33,01	4,73			280,93	8,15	0,83	26,82			
216,16-216,21	0,30	0,03	0,99	19,94			286,78-286,85	11,98	0,39	42,47	0,12		
216,32-216,45	11,60	0,19	41,81				288,87-288,98	12,07	0,21	43,35			
216,63-216,67	12,15	0,39	43,09	0,20			289,53-289,58	11,95	0,55	41,77	0,24		
217,04-217,12	1,18	0,28	3,30	0,70			290,00	12,31	0,40	43,64	0,12		
217,38-217,42	11,43	0,47	40,16	0,20			290,35-290,40	12,08	0,37	42,91	0,24		
219,18-219,20	11,26	0,14	40,75	0,15			290,85-290,90	12,58	0,76	43,31	0,14		
219,74-219,81	0,98	0,32	2,42	2,00			291,77-291,81	12,03	0,03	43,97	0,23		
219,96-220,05	1,23	1,05	0,66				292,20-292,22	11,62	0,22	42,25	0,09		
220,30	0,96	0,77	0,70	1,58			292,77-292,80	12,34	0,23	44,37	0,15		
220,89-220,93	12,59	0,46	44,45				294,20-294,25	11,84	0,17	42,76	0,08		
222,23-222,28	12,70	0,20	45,80				294,60-294,65	11,15	0,62	36,58	0,39		
222,81-222,90	13,09	0,81	45,00				295,01-295,06	9,43	0,19	33,85	0,26		
223,34-223,40	12,96	0,35	46,21	0,41			297,41-297,47	7,52	0,13	27,08	0,26		
224,14-224,19	12,70	0,34	45,29				298,15-298,20	11,81	0,69	40,75	0,32		
226,22-226,29	12,93	0,53	45,44				300,50-300,55	11,50	0,78	39,28	0,24		
229,60-229,70	12,85	0,21	46,32				301,29-301,34	11,58	0,57	36,68	0,81		
232,00-232,13	12,70	0,26	45,58	0,40			302,63-302,67	12,34	1,31	40,42	0,31		
235,61-235,67	12,96	0,36	46,17				303,01-303,05	6,02	0,12	21,62	0,90		
236,90-236,98	12,39	0,27	44,41				306,62-306,65	10,86	0,55	37,78	0,40		
238,55-238,63	12,41	0,27	44,48				307,25-307,27	0,39	0,01	1,39	15,67		
241,45-241,50	12,03	0,41	42,58				308,92-309,00	5,08	-	18,61	3,77		
245,09-245,18	12,17	0,44	42,98				309,60-309,68	5,63	0,06	20,41	6,92		
248,23-248,25	12,37	0,66	42,91	0,17			311,13-311,20	7,56	0,69	24,92	0,89		
251,91-252,05	11,68	0,44	41,19				312,22-312,24	8,27	0,17	29,68	1,75		
253,69-253,76	12,06	0,35	42,91				312,80-312,88	0,18	0,03	0,37	19,13		
254,61	11,59	0,62	40,20				313,79-313,85	2,16	0,02	7,84	19,13		
							316,00-316,06	0,08	-	0,29	15,63		
							320,75-320,79	2,08	0,04	7,48	16,50		

Tabelle 13: Umtauschkapazität (UK) in mVal/100 g, austauschbare Kationen und Ionenbelegung. pH der Proben in dest. H₂O und in 0,01 n CaCl₂

Probe Tiefe in m	Geologische Formation	pH		Ionenbelegung mVal/100g				Total = UK (mVal/ 100g)
		H ₂ O	CaCl ₂	K+	Na+	Mg++	Ca++	
24,00- 31,04	Opalinus-Ton	8,90	8,30	0,50	2,30	2,10	11,80	16,70
31,04- 38,61		9,40	8,10	0,50	4,20	1,70	11,00	17,40
38,61- 46,15		9,50	8,10	0,50	5,40	1,20	7,40	14,50
46,15- 53,65		9,50	8,20	0,50	5,70	1,10	5,70	13,00
53,65- 60,25		9,00	8,20	0,80	6,20	1,40	7,80	16,20
60,25- 65,73		9,30	8,10	0,60	6,50	1,50	7,40	16,00
71,32- 71,55	Posidonien- schiefer	9,10	8,30	0,70	3,70	3,30	17,30	25,00
74,20- 74,37		8,70	8,20	0,70	4,00	3,40	18,50	26,60
82,99- 83,14	Obtusius-Tone	9,80	8,40	0,80	4,50	3,00	11,80	20,10
88,70- 88,90		9,80	8,50	1,40	4,80	3,70	13,30	23,20
100,46-100,66	Obere bunte Mergel	9,70	8,60	0,50	4,90	4,80	7,90	18,10
104,95-105,05		9,90	8,80	0,50	4,80	4,20	6,30	15,80
110,40-110,43	Untere bunte Mergel	9,20	7,80	3,39	10,11	2,21	4,62	20,33
130,92-131,00	Schilfsandstein	9,00	7,90	3,45	7,86	3,65	7,30	22,26
150,25-150,40	Gipskeuper	9,80	8,10	3,48	6,47	9,76	8,58	28,29
190,05-190,10		7,60	7,20	2,62	8,45	6,99	8,14	26,20
212,78-212,85		8,70	7,80	4,08	2,04	7,90	10,20	24,22
303,01-303,15	Obere Sulfat- schichten der "Anhydritgruppe" (Mergel)	9,10	8,00	3,36	1,22	7,66	13,16	25,40

Tabelle 14: Gammaskpektrometrische Messungen

Probe Tiefe in m	Radioelementgehalte		Th (ppm)
	K (%)	U (ppm)	
24,00- 31,04	2,17	2,20	12,00
31,04- 38,61	2,36	2,20	12,80
38,61- 46,15	2,52	2,20	13,90
46,15- 53,65	2,64	2,40	14,00
53,65- 60,25	2,80	2,60	14,00
60,25- 65,73	2,89	2,60	14,40
66,69- 66,82	1,51	2,00	6,80
71,32- 71,55	1,73	5,20	7,20
74,20- 74,37	1,88	4,00	7,60
77,58- 77,75	2,14	2,60	11,70
80,33- 80,53	1,53	2,00	9,10
82,99- 83,14	2,49	2,90	12,10
88,75- 88,90	2,67	2,20	13,10
92,51- 92,67	3,02	1,80	14,40
100,46-100,66	1,74	1,80	9,20
104,95-105,05	1,59	1,10	7,60
106,78-106,85	0,60	1,10	2,00
109,85-109,95	3,89	1,80	11,50
112,78-112,90	4,26	1,90	10,90
117,73-117,83	3,83	1,70	10,90
121,79-121,90	3,67	1,90	8,90
126,80-127,00	1,93	2,40	4,30
139,83-140,00	0,72	1,10	2,90
150,15-150,25	1,56	1,40	5,80
159,65-159,75	0,82	1,30	2,70
159,90-160,00	0,94	1,50	3,00
179,90-180,00	3,25	2,20	10,40
190,00-190,10	2,66	2,10	8,20
199,60-199,70	1,32	1,50	3,70
214,00-214,35	0,11	0,90	0,60
225,25-225,70	0,02	1,70	0,30
234,60-235,00	0,06	2,50	0,60
245,25-245,65	0,13	1,00	0,40
254,75-255,19	0,47	1,50	0,80
264,85-265,25	0,34	1,50	0,70
274,90-275,40	0,24	2,00	0,50
285,45-285,85	0,05	2,50	0,30
295,35-295,85	0,09	3,90	0,60
305,67-306,10	0,46	1,90	1,20
314,92-315,40	0,16	0,30	0,40
317,00-317,40	0,02	0,10	0,00

6. Art und Reife des organischen Materials in Bohrkernen der mesozoischen Sedimente

(P. K. Mukhopadhyay & D. Leythaeuser, Institut für Erdöl und Organische Geochemie [ICH-5], KFA Jülich GmbH, Jülich)

6.1 Allgemeines

Die Bildung von Kohlenwasserstoffen in Muttergesteinen hängt ab von deren Temperaturgeschichte im Laufe der Absenkung und der Menge und Art des vorhandenen feinverteilten organischen Materials (TISSOT and WELTE 1978; HUNT 1979). Daher ist die Ansprache von Art und Reifegrad des in einem Tonschiefer feinverteilten organischen Materials die wichtigste Voraussetzung zur Charakterisierung seines Muttergesteinspotentials. Dabei hat sich zur Bestimmung des Reifegrads besonders die Messung des Reflexionsvermögens der feinverteilten Vitrinitpartikel bewährt (DOW 1977; BOSTICK 1979; POWELL et al. 1982; STACH et al. 1982). Zur zusätzlichen Absicherung und zur Ausdehnung des Empfindlichkeitsbereichs werden neuerdings fluoreszenzmikroskopische Untersuchungen vermehrt herangezogen (TEICHMÜLLER 1982; TEICHMÜLLER and DURAND 1983). Die Art des in einem potentiellen Muttergestein in feiner Verteilung vorliegenden organischen Materials kann auf zwei grundsätzlich verschiedene Arten festgestellt werden, entweder durch chemische oder durch optisch-mikroskopische Untersuchungsverfahren. Beispiele für chemische Verfahren sind Elementaranalysen an Kerogenkonzentraten (TISSOT et al. 1974) sowie Pyrolyse-Untersuchungen von Gesamtgesteinen (ESPITALIÉ et al. 1977). Im Hinblick auf mikroskopische Verfahren sind in diesem Zusammenhang die Charakterisierung der Mazeralzusammensetzung im Durchlicht- und im Auflichtpräparat zu nennen (STACH et al. 1982; MUKHOPADHYAY et al. 1983).

Das Ziel der vorliegenden Untersuchungen war, das in den Gesteinen des untersuchten Intervalls der Bohrung feinverteilte organische Material zu charakterisieren im Hinblick auf seine Art und Herkunft sowie im Hinblick auf seinen Reifegrad. Aufgrund dieser Daten sollten Angaben über das Kohlenwasserstoff-Bildungspotential der durchteuften Schichtenfolge gemacht und seine Beziehungen zur Lithologie und Stratigraphie aufgezeigt werden.

6.2 Probenmaterial und Methodik

Insgesamt 15 Kernproben aus dem Intervall 24,26 m bis 302,54 m wurden zur Untersuchung ausgewählt. Sie umfassen den stratigraphischen Bereich vom mittleren Jura (Opalinus-Ton) bis zur mittleren Trias (Dolomit der «Anhydritgruppe» des mittleren Muschelkalks). Die überwiegende Zahl der Proben ist klastischer Lithologie (dunkle Tone, Siltsteine, Feinsandsteine), während einige Proben Übergangsglieder zu Karbonatgesteinen darstellen (Ton- und Kalkmergel). Einzelheiten der lithologischen Einstufung der untersuchten Proben sind Tabelle 15 und Beilage 3 zu entnehmen.

Von allen Proben wurde nach Entkarbonatisierung der Gehalt an organischem Kohlenstoff mittels der LECO-Methode bestimmt, sowie die Ausbeuten an pyrolysierbarem organischem Material nach dem Rock-Eval-Verfahren (ESPITALIÉ et al. 1977) gemessen. Für die mikroskopischen Untersuchungen wurden Kerogenkonzentrate hergestellt durch Behandlung des gemahlene Gesteins mit 4-n Salzsäure und anschließender Dichteflotation/Zentrifugation der separierten Partikel mit Zinkjodidlösung der Dichte 1,95 g/cm³. Die in «Transoptic»-Kunststoff eingebetteten Kerogenkonzentrate wurden mit «Carborund 600» und Aluminiumpulver (0,5 Mikron) geschliffen und poliert. Die Mazeralanalyse wurde an zwei verschiedenen Präparaten durchgeführt: an Streupräparaten im Durchlicht und an polierten Anschliffen im reflektierten Licht (nor-

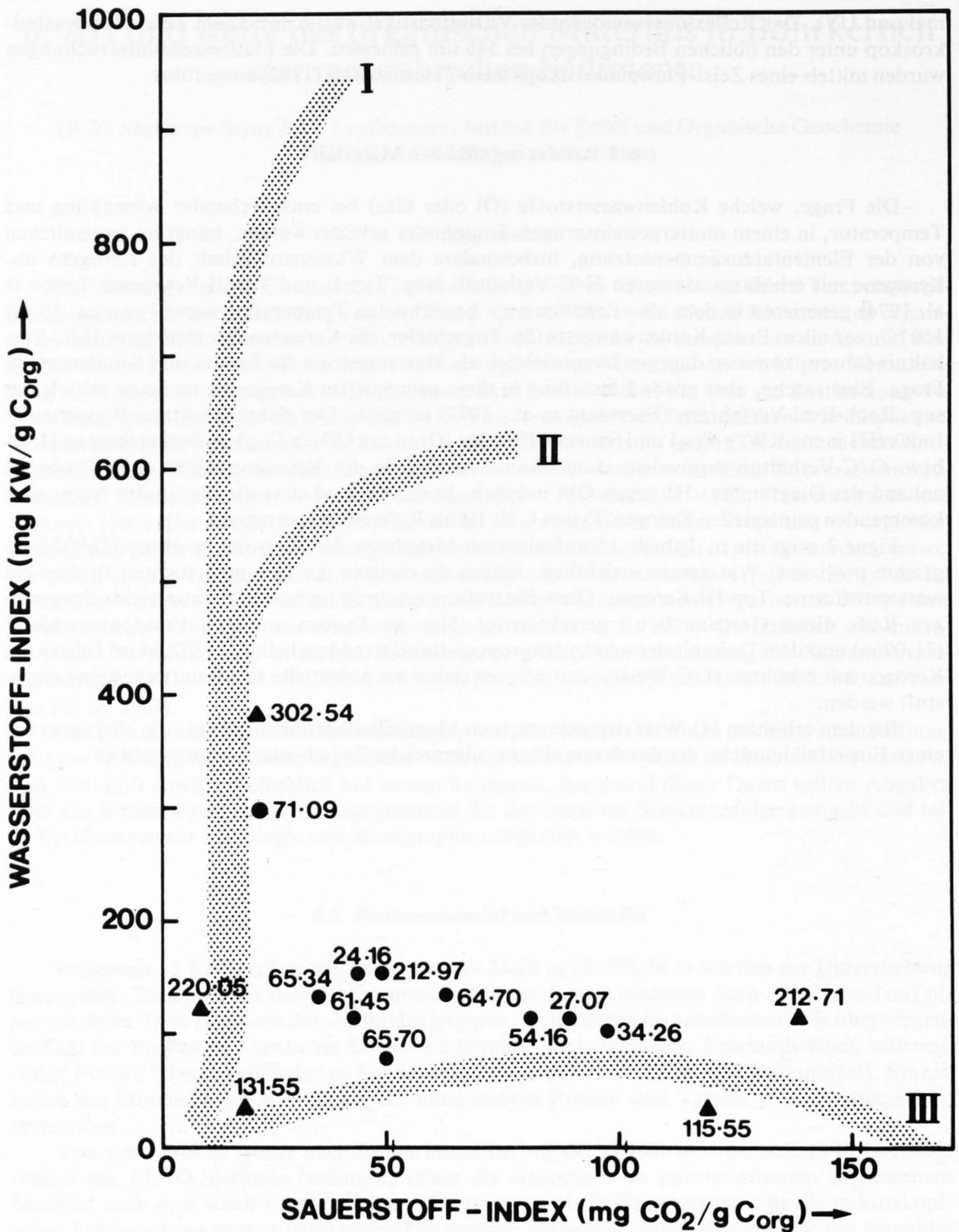
mal und UV). Das Reflexionsvermögen der Vitrinitpartikel wurde mit einem Zeiss-Universalmikroskop unter den üblichen Bedingungen bei 546 nm gemessen. Die Fluoreszenzuntersuchungen wurden mittels eines Zeiss-Photomikroskops nach TEICHMÜLLER (1982) ausgeführt.

6.3 Art des organischen Materials

Die Frage, welche Kohlenwasserstoffe (Öl oder Gas) bei entsprechender Absenkung und Temperatur, in einem muttergesteinsartigen Tonschiefer gebildet werden, hängt im wesentlichen von der Elementarzusammensetzung, insbesondere dem Wasserstoffgehalt des Kerogens ab. Kerogene mit erhöhtem atomarem H/C-Verhältnis (sog. Typ-I- und Typ-II-Kerogene; TISSOT et al. 1974) generieren in dem als «Erdölfenster» bezeichneten Temperaturintervall von ca. 50 bis 150 °C, vor allem Erdöl-Kohlenwasserstoffe. Tonschiefer, die Kerogene mit niedrigem H/C-Verhältnis führen, kommen dagegen hauptsächlich als Muttergesteine für Erdgas und Kondensate in Frage. Eine rasche, aber grobe Einstufung in diese prinzipiellen Kategorien ist heute mittels des sog. Rock-Eval-Verfahrens (ESPITALIÉ et al., 1977) möglich: Der dabei ermittelte Wasserstoff-Index (HI in mg KW/g C_{Org}) und Sauerstoff-Index (OI in mg CO₂/g C_{Org}) ist dem atomaren H/C- bzw. O/C-Verhältnis äquivalent. Eine rasche Ansprache der Kerogenqualität einer Probe ist anhand des Diagramms «HI gegen OI» möglich. In diesem sind stets die drei in der Natur vorkommenden prinzipiellen Kerogen-Typen I, II, III als Referenz eingetragen.

Figur 2 zeigt die in Tabelle 15 aufgelisteten Messdaten der Bohrung in dieses HI/OI-Diagramm projiziert. Wie daraus ersichtlich, führen die meisten der hier untersuchten Proben ein wasserstoffarmes Typ-III-Kerogen. Diese Einstufung erscheint insbesondere angesichts der geringen Reife dieser Gesteine (s. u.) gerechtfertigt. Nur die Proben aus dem Posidonienschiefer (71,09 m) und dem Dolomit der «Anhydritgruppe» (mittlerer Muschelkalk) (302,54 m) führen ein Kerogen mit erhöhten H/C-Werten und können daher als potentielle Erdölmuttergesteine eingestuft werden.

Bei dem erhöhten HI-Wert der untersuchten Muschelkalkprobe dürfte es sich allerdings um einen Einzelfall handeln, der durch mm-dünne, algenreiche Zwischenlagen verursacht ist.



Figur 2: Ansprache der Kerogen-Qualität der untersuchten Kernproben aufgrund ihrer Stellung im Diagramm Wasserstoff- gegen Sauerstoff-Index (nach ESPITALIÉ et al. 1977).

Die Proben sind durch ihre Tiefe indiziert.

Kreise = Proben aus dem Jura

Dreiecke = Proben aus der Trias

Tabelle 15: Geochemische Daten zur Kerogen-Charakterisierung aufgrund von Rock-Eval-Pyrolysemessungen an Kernproben

1	2	3	4	5	6	7	8
24,26	Ops	Tonschiefer	1,02	145	44	0,02	433
27,07	Ops	Tonschiefer	0,83	113	89	0,03	432
34,26	Ops	Tonschiefer mit Sandstein	0,73	100	98	0,04	432
54,16	Uops	Tonschiefer	1,06	117	81	0,04	434
61,65	Uops	Tonschiefer	1,05	114	43	0,03	433
64,70	Uops	Tonschiefer	1,03	133	62	0,03	431
65,34	Uops	Tonschiefer	1,06	131	35	0,03	430
65,70	Uops	Kalkmergel	0,78	77	50	0,05	428
71,09	Pos	Tonschiefer	1,67	303	36	0,01	437
115,55	Sls	Tonmergel	0,05	31	119	0,51	-
131,55	Sls	Ton in Gips	0,64	32	19	0,05	418
212,71	Letk	dolomit. Tonmergel	0,20	112	139	0,16	432
212,97	Letk	dolomit. Tonmergel	0,56	172	49	0,06	434
220,05	Letk	Dolomit	1,19	122	9	0,05	431
302,54	Ando	Dolomit/Anhydrit	1,04	387	21	0,12	431

Legende

- | | |
|---|--|
| 1 = Tiefe (m) | 5 = Wasserstoff-Index (mg KW/g C _{org}) |
| 2 = Stratigraphie | 6 = Sauerstoff-Index (mg CO ₂ /g C _{org}) |
| 3 = Lithologie der untersuchten Probe | 7 = Produktions-Index (s ₁ /s ₂ +s ₂) |
| 4 = Organischer Kohlenstoff (% C _{org}) | 8 = Temperatur des maximalen thermischen Kerogenabbaus T _{max} (°C) |

Für die stratigraphischen Einheiten werden folgende Abkürzungen verwendet:

Sch = Schotter; Mor = Moräne; Ops = Opalinus-Ton; Uops = unterster Opalinus-Ton (Lias); Jus = Jurensis-Mergel; Pos = Posidonienschiefer; Alnu = Amaltheenschichten-Numismalis-Schichten; Obs = Obtusus-Tone; Ari = Arietenkalk; Inm = Insektenmergel; Obb = Obere bunte Mergel; Gad = Gansinger-Dolomit; Unb = Untere bunte Mergel; Sls = Schilfsandstein; Gps = Gipskeuper; Letk = Lettenkohle; Trid = Trigonodus-Dolomit; Plkl = Plattenkalk; Trkl = Trochitenkalk; Ando = Dolomit der «Anhydritgruppe»; Angr = Obere Sulfatschichten der «Anhydritgruppe»

Dieser stratigraphischen Einheit insgesamt wird kein erhöhtes Erdölmuttergesteinspotential zugewiesen. Der sogenannte Produktions-Index (Tabelle 15), der aus den Messergebnissen des Rock-Eval-Verfahrens berechnet wird, erlaubt u. a. die Feststellung von migrierten Kohlenwasserstoffen. Der für nahezu alle Proben aus dieser Bohrung sehr niedrige Wert für den Produktions-Index deutet daraufhin, dass keine Kohlenwasserstoff-Migration in nennenswertem Umfang stattgefunden hat, was im Einklang mit der niedrigen Reife dieser Schichtfolge steht.

Eine weitere Möglichkeit, die Art des in einem Gestein in feiner Verteilung vorkommenden organischen Materials zu erfassen, besteht in der Charakterisierung der im Kerogenkonzentrat mikroskopisch erfassbaren organischen Partikel bzw. Mazerale (STACH et al. 1982; MUKHOPADHYAY et al. 1983). Diese als organische Petrologie bezeichnete Arbeitsrichtung lehnt sich eng an die Kohlenpetrographie an und bedient sich auch weitgehend der gleichen Nomenklatur zur Benennung der Mazerale. Die bei mikroskopischer Betrachtung erfassbaren Mazerale werden im Hinblick auf ihre biologische oder diagenetische Herkunft eingestuft und in ihren relativen Mengenanteilen (als % vom Kerogenkonzentrat) angegeben. Im Hinblick auf die Charakterisierung des Muttergesteinspotentials einer Probe darf man aber bei Anwendung dieser Methodik nicht ausser acht lassen, dass in der Regel nur ein kleiner – und nicht notwendigerweise repräsentativer – Anteil des gesamten in einer Probe vorhandenen Kerogens in Form mikroskopisch sichtbarer organischer Partikel vorliegt. Der in submikroskopisch feiner Verteilung vorliegende Rest des Kerogens trägt aber zum Kohlenwasserstoff-Potential in gleicher Weise bei (POWELL et al. 1982).

Wie aus Tabelle 16 ersichtlich, bestehen die Mazerale der Kerogenkonzentrate der meisten untersuchten Proben überwiegend aus Vitriniten. Vitrinite und Inertinite machen in den meisten Fällen mehr als $\frac{2}{3}$ des gesamten Kerogenkonzentrats aus. Diese Beobachtung ist ein weiteres Indiz für die oben getroffene Einstufung dieser Proben in den Kerogentyp III, d. h. Kerogene, die zum überwiegenden Teil aus den Überresten von Landpflanzenmaterial abgeleitet sind. Bei den Vitriniten lassen sich jedoch mehrere Typen unterscheiden, die unten ausführlich diskutiert werden. Liptinite, die aufgrund ihres hohen H/C-Verhältnisses zur Kohlenwasserstoff-Bildung prädestiniert sind, treten in erhöhten Anteilen (mehr als 50%) in folgenden Proben auf: 71,09 m (Posidonieschiefer), 212,97 m (Dolomit-Gips, Wechsellagerung des Gipskeuper) und 220,05 m (Lettenkohle). Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang die Beobachtung, dass unter allen untersuchten Proben der Posidonieschiefer die beste Kerogenqualität zeigt (basierend sowohl auf Rock-Eval- als auch Mazerale-Daten) und damit als das beste potentielle Erdöl-Muttergestein dieser Schichtfolge eingestuft werden kann.

Weiterhin lässt sich feststellen, dass die Kerogene der jurassischen Proben in der Regel reicher an Sporen und biodegradierten Liptiniten sind als die triassischen Proben. In den Proben 24,16 m und 65,34 m kommen *Tasmanites*-artige Algen und in der Probe 34,26 m Dinoflagellaten vor. Die Kerogene der triassischen Proben ihrerseits werden hauptsächlich aus amorphen, unfigurierten Liptiniten aufgebaut, die gelbbraune Fluoreszenz zeigen und häufig reich an feindispersen Pyrit sind.

6.4 Reife des organischen Materials

Bei der Ermittlung des Reifegrads eines Muttergesteins anhand von Vitrinitreflexionsmessungen ist die Identifizierung und korrekte Ansprache von autochthonen Vitrinit-Partikeln von entscheidender Bedeutung. Mitunter ist dies schwierig, z. B. wenn in der untersuchten Probe Bitumen-Partikel und strukturlose Vitrinite nebeneinander auftreten. Ein besonderes Problem stellen Proben, die reich an re-sedimentierten Vitriniten sind, welche aus der Abtragung und Umlagerung älterer Sedimente oder auch Kohleflözen hervorgegangen sind. Dieses Problem trat in besonderem Masse bei der Untersuchung der Proben aus der Bohrung Nr. 7904, Beznau, auf. Erst bei einer sorgfältigen Nachmessung aller Proben und vor allem durch zusätzliche Reifebestimmungen mittels fluoreszenzmikroskopischer Messverfahren, die an fünf ausgewählten Proben ausgeführt wurden (Tabelle 17), konnte re-sedimentierter Vitrinit sicher angesprochen wer-

den. Somit konnte sichergestellt werden, dass für die Berechnung des mittleren Reflexionsvermögens nur der autochthone Vitrinit berücksichtigt wurde.

In Figur 3 ist dieses Problem am Beispiel der Proben 61,45 m und 220,05 m (unterster Opalinus-Ton bzw. Lettenkohle) erläutert. Die hier als re-sedimentierte Vitrinite angegebenen Partikel zeigen bei genauer Betrachtung häufig feine Risse und/oder unregelmässig korrodierte Ränder, die als Verwitterungsphänomene gedeutet werden. Dagegen sind die niedriger reflektierenden Vitrinitpartikel (ca. 0,45–0,75%) in der Regel ohne Risse und von scharfkantiger Gestalt. Nur das Reflexionsvermögen dieser Partikel fand bei der Berechnung der Mittelwerte für jede Probe Berücksichtigung (Tabelle 17). Wie aus Figur 3 auch ersichtlich, dominiert in manchen Proben mengenmässig die Population der re-sedimentierten Vitrinitpartikel. Um diese Interpretation zusätzlich abzusichern, wurden an Sporiniten aus fünf ausgewählten Proben die folgenden fluoreszenzmikroskopischen Parameter bestimmt: Der sog. λ_{\max} -Wert ist die Wellenlänge der maximalen Fluoreszenzintensität, und der sog. Q-Wert oder «Rot/Grün-Quotient» ist das Verhältnis der relativen Fluoreszenzintensitäten bei 650 und 500 nm (OTTENJANN et al. 1974). Die Beziehung dieser beiden Reife-abhängigen Parameter zur Vitrinitreflexion ist bekannt (TEICHMÜLLER 1982) bzw. kann zur Umrechnung in % R_m -Werte benutzt werden. Diese sind in Spalte 9 der Tabelle 17 aufgelistet. Wegen der Variationsbreite in den betreffenden Zweiwertdiagrammen kann dabei jeweils nur ein Bereich angegeben werden. Diese fluoreszenzmikroskopisch bestimmten Reifewerte bestätigen in ihrer Tendenz die aufgrund o. a. Überlegungen ermittelten Vitrinitreflexionswerte (% R_m), wenn auch in Einzelfällen kleinere Unterschiede auftreten.

Tabelle 16: Mazeralzusammensetzung der Kerogenkonzentrate aus Kernproben

Materialzusammensetzung (Vol. %)						
1	2	3	4			
			4.1	4.2	4.3	4.4
24,16	50	10	-	-	5	35
27,07	40	20	40	-	-	-
34,26	55	5	30	10	-	-
54,16	58	11	31	-	-	-
61,45	55	15	10	-	-	20
64,70	60	10	5	-	-	25
65,34	57	8	5	-	5	25
65,70	71	9	-	-	-	20
71,09	25	5	52	-	-	18
131,55	60	5	5	-	-	30
212,71	50	7	32	-	-	11
212,97	39	3	15	1	1	41
220,05	40	5	6	5	3	41

Legende

- 1 = Tiefe (m)
- 2 = Vitrinit
- 3 = Inertinit
- 4 = Liptinit

(Vol. %)

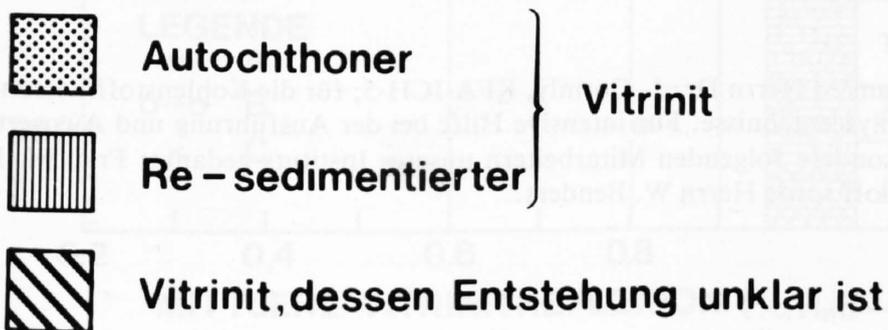
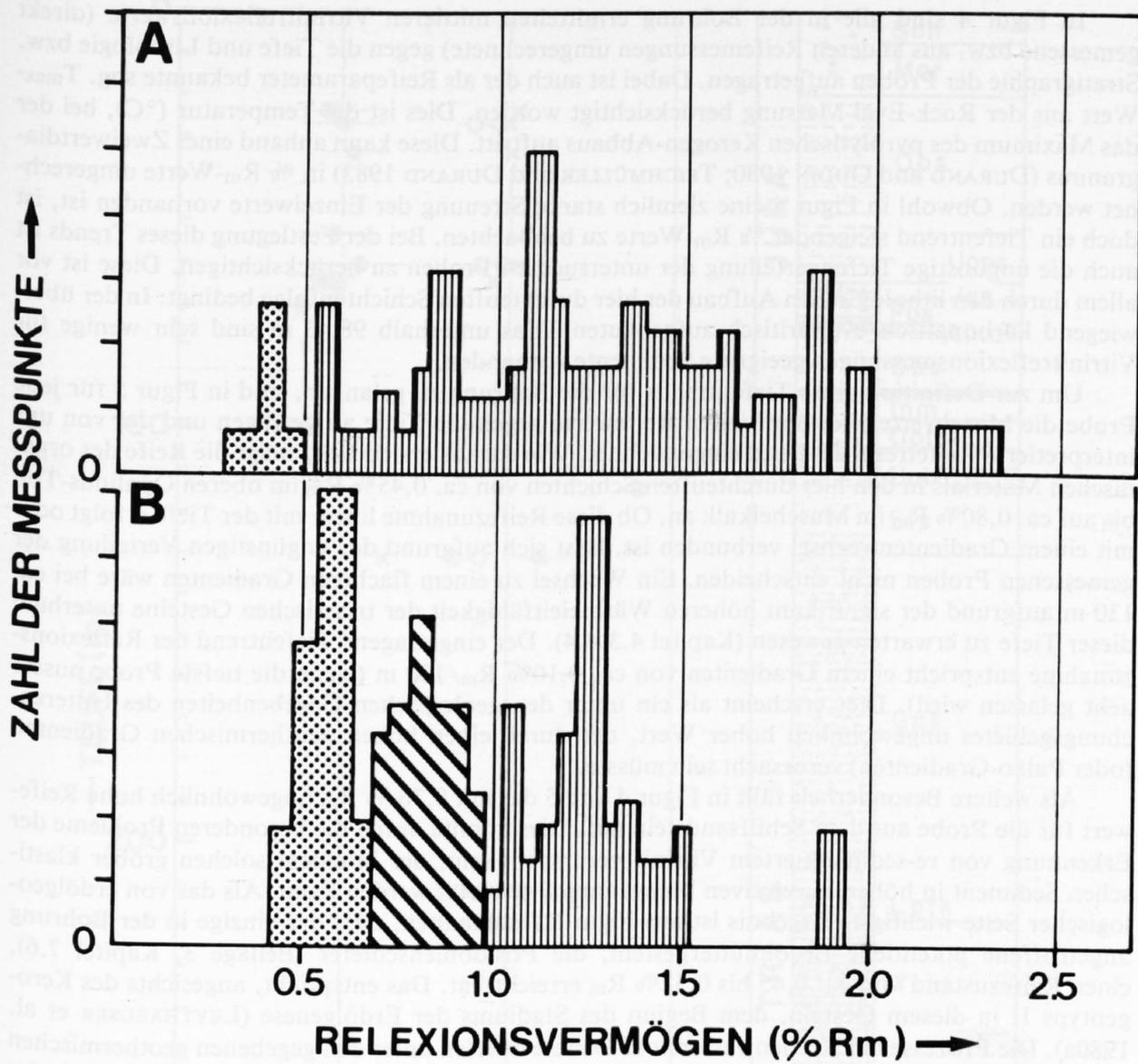
- 4.1 = Sporinit, Kutinit, Suberinit und Resinit
- 4.2 = Ueberreste von Phyto- oder Zooplankton (ausser Alginit)
- 4.3 = Alginit
- 4.4 = Unfigurierter Liptinit

Tabelle 17: Reflexionsmikroskopisch ermittelte Reifeparameter für Kernproben

VITRINIT-REFLEXION			SPEKTRALFLUORESZENZMESSUNGEN					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
24,16	0,38	0,05	11	-	-	-	0,61	0,50
27,07	0,40	0,05	5	576	1,00	0,56-0,58	0,60	0,52
34,26	0,41	0,04	11	-	-	-	0,60	0,51
54,16	0,39	0,05	17	-	-	-	0,62	0,51
61,45	0,42	0,06	5	580	1,05	0,57-0,59	0,61	0,54
64,70	0,37	0,04	13	-	-	-	0,58	0,48
65,34	0,37	0,02	4	-	-	-	0,58	0,48
65,70	0,39	-	1	-	-	-	0,55	0,47
71,09	0,35	0,01	3	-	-	-		0,35
115,55	0,76(?)	-	1	-	-	-		0,76(?)
131,55	0,64	0,03	6	568	0,87	0,54-0,56	0,45	0,55
212,71	0,62	0,03	6	570	0,92	0,55-0,57	0,60	0,59
212,97	0,68	0,03	15	-	-	-	0,62	0,65
220,03	0,58	0,05	43	584	1,20	0,60-0,65	0,58	0,60
302,54	0,81(?)	0,04	19	-	-	-	-	0,81(?)

Legende

- 1 = Tiefe (m)
 2 = Mittlere Vitrinireflexion (% R_m)
 3 = Standardabweichung
 4 = Zahl der Messpunkte
 5 = λ_{max} = Maximum der relativen Fluoreszenzintensität im Spektrum 400-700 nm
 6 = Q = Rot/Grün-Quotient (Spektralquotient) = $\frac{\text{relative Intensität bei 650 nm}}{\text{relative Intensität bei 500 nm}}$
 7 = Mittlere Vitrinireflexion nach TEICHMÜLLER (1982) berechnet aus λ_{max} und Q
 8 = Mittlere Vitrinireflexion nach DURAND und OUDIN (1979) berechnet aus T_{max}
 9 = Aus Spalte 2,7 und 8 berechnete mittlere Vitrinireflexion (% R_m)



Figur 3: Typische Beispiele für Variation und Interpretation der gemessenen Reflexionswerte für Vitrit-Partikel in Kernproben.

A = Tonschiefer, 61,45 m (unterster Opalinus-Ton)

B = Dolomit, 220,05 m (Lettenkohle)

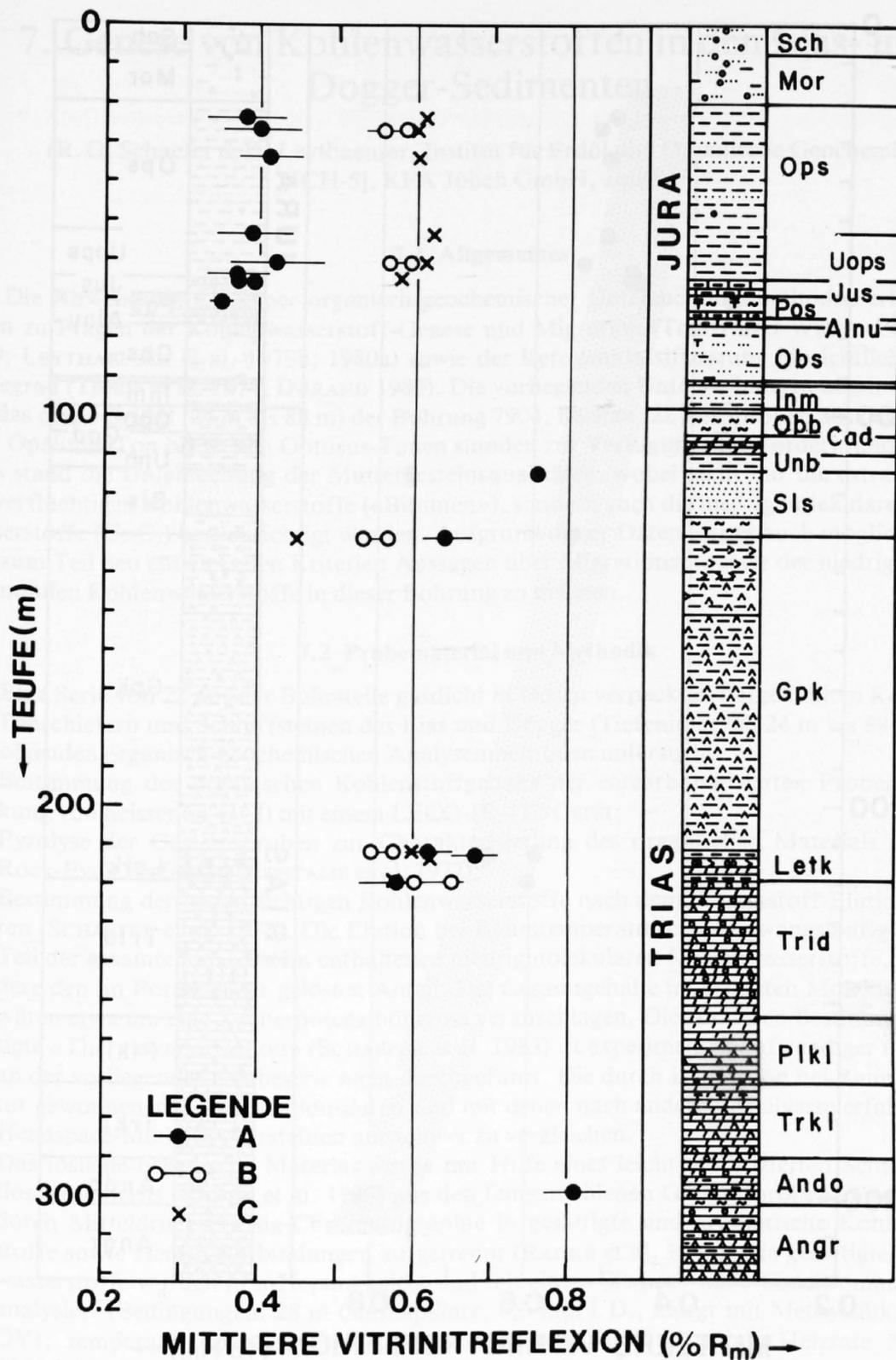
In Figur 4 sind alle in der Bohrung ermittelten mittleren Vitrinitreflexionswerte (direkt gemessene bzw. aus anderen Reifemessungen umgerechnete) gegen die Tiefe und Lithologie bzw. Stratigraphie der Proben aufgetragen. Dabei ist auch der als Reifeparameter bekannte sog. T_{\max} -Wert aus der Rock-Eval-Messung berücksichtigt worden. Dies ist die Temperatur ($^{\circ}\text{C}$), bei der das Maximum des pyrolytischen Kerogen-Abbaus auftritt. Diese kann anhand eines Zweiwertdiagramms (DURAND and OUDIN 1980; TEICHMÜLLER and DURAND 1983) in % R_m -Werte umgerechnet werden. Obwohl in Figur 4 eine ziemlich starke Streuung der Einzelwerte vorhanden ist, ist doch ein Tiefentrend steigender % R_m -Werte zu beobachten. Bei der Festlegung dieses Trends ist auch die ungünstige Tiefenverteilung der untersuchten Proben zu berücksichtigen. Diese ist vor allem durch den lithologischen Aufbau der hier durchteuften Schichtenfolge bedingt: In der überwiegend karbonatisch/evaporitisch aufgebauten Trias unterhalb 98,43 m sind sehr wenige für Vitrinitreflexionsmessungen geeignete Sedimente vorhanden.

Um zur Definition eines Tiefentrends für die Bohrung zu gelangen, sind in Figur 5 für jede Probe die Mittelwerte aller ermittelten Reifewerte gegen die Tiefe aufgetragen und der von uns interpretierte Reifetrend als Band eingezeichnet. Wie daraus ersichtlich, steigt die Reife des organischen Materials in den hier durchteuften Schichten von ca. 0,45% R_m im oberen Opalinus-Ton bis auf ca. 0,80% R_m im Muschelkalk an. Ob diese Reifezunahme linear mit der Tiefe erfolgt oder mit einem Gradientenwechsel verbunden ist, lässt sich aufgrund der ungünstigen Verteilung der gemessenen Proben nicht entscheiden. Ein Wechsel zu einem flacheren Gradienten wäre bei ca. 130 m aufgrund der signifikant höheren Wärmeleitfähigkeit der triassischen Gesteine unterhalb dieser Tiefe zu erwarten gewesen (Kapitel 4.3.4.4). Der eingetragene Tiefentrend der Reflexionszunahme entspricht einem Gradienten von ca. 0,10% $R_m/100$ m (wenn die tiefste Probe ausser acht gelassen wird). Dies erscheint als ein unter den geologischen Gegebenheiten des Untersuchungsgebietes ungewöhnlich hoher Wert, der durch einen hohen geothermischen Gradienten (oder Paläo-Gradienten) verursacht sein müsste.

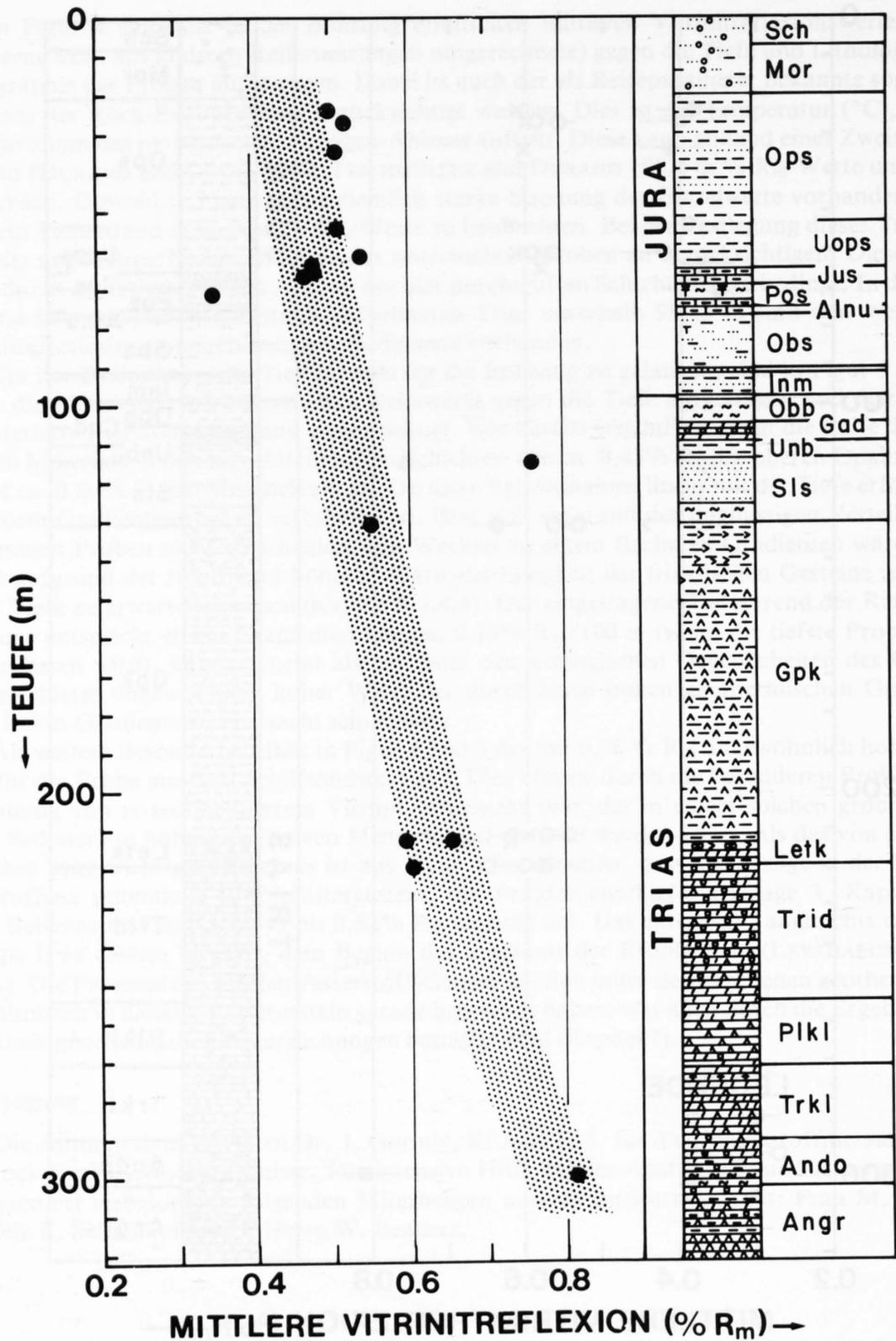
Als weitere Besonderheit fällt in Figur 4 und 5 der mit 0,76 % R_m ungewöhnlich hohe Reifewert für die Probe aus dem Schilfsandstein auf. Dies könnte durch die besonderen Probleme der Erkennung von re-sedimentiertem Vitrinit verursacht sein, der in einem solchen gröber klastischen Sediment in höherem relativen Mengenanteil erwartet werden kann. Als das von erdölgeologischer Seite wichtigste Ergebnis ist aus Figur 5 festzuhalten, dass das einzige in der Bohrung angetroffene potentielle Erdölmuttergestein, die Posidonienschiefer (Beilage 3, Kapitel 7.6), einen Reifezustand von ca. 0,45 bis 0,52% R_m erreicht hat. Das entspricht, angesichts des Kerogentyps II in diesem Gestein, dem Beginn des Stadiums der Erdölgenese (LEYTHAEUSER et al. 1980a). Die Prozesse der Kohlenwasserstoff-Genese dürften unter den gegebenen geothermischen Verhältnissen in diesem Muttergestein gerade begonnen haben, was auch durch die Ergebnisse der organisch-geochemischen Untersuchungen bestätigt wird (Kapitel 7).

Danksagung

Die Autoren danken Herrn Dr. J. Gormly, KFA-ICH-5, für die Kohlenstoffmessungen und die Rock-Eval-Pyrolyseergebnisse. Für intensive Hilfe bei der Ausführung und Auswertung der Analysen sei insbesondere folgenden Mitarbeitern unseres Instituts gedankt: Frau M. Derichs, Fräulein K. Sellinghoff sowie Herrn W. Benders.



Figur 4: Variation aller ermittelten Vitrinitreflexionswerte mit der Tiefe, Lithologie und Stratigraphie.
 A = Mittlere Vitrinitreflexion (% R_m), gemessen
 B = Mittlere Vitrinitreflexion (% R_m), umgerechnet nach TEICHMÜLLER (1982) aus λ_{max} und Q der Spektralfluoreszenz-
 messungen von Sporiniten.
 C = Mittlere Vitrinitreflexion (% R_m), nach DURAND and OUDIN (1980), umgerechnet aus T_{max} -Daten.
 Erklärung der verwendeten stratigraphischen Abkürzungen siehe Fussnote zu Tabelle 15.



Figur 5: Variation des Mittelwertes aller ermittelten und in Figur 4 dargestellten Vitrinitreflexionswerte mit der Tiefe. Der hier interpretierte Tiefentrend ergibt einen Reifegradienten für die Bohrung Nr. 7904, Beznau, von 0,10% R_m/100 m. Erklärung der verwendeten stratigraphischen Abkürzungen siehe Fussnote zu Tabelle 15.

7. Genese von Kohlenwasserstoffen in den Lias- und Dogger-Sedimenten

(R. G. Schaefer & D. Leythaeuser, Institut für Erdöl und Organische Geochemie [ICH-5], KFA Jülich GmbH, Jülich)

7.1 Allgemeines

Die Anwendung moderner organisch-geochemischer Untersuchungsmethoden erlaubt Aussagen zu Fragen der Kohlenwasserstoff-Genese und Migration (TISSOT and WELTE 1978; HUNT 1979; LEYTHAEUSER et al. 1979b; 1980a) sowie der Kerogenklassifizierung hinsichtlich Typ und Reifegrad (TISSOT et al. 1974; DURAND 1980). Die vorliegenden Untersuchungen beschränken sich auf das obere Drittel (24 m bis 88 m) der Bohrung 7904, Beznau. 22 Kernproben aus dem Intervall vom Opalinus-Ton bis zu den Obtusus-Tonen standen zur Verfügung. Im Vordergrund des Interesses stand die Untersuchung der Muttergesteinsqualitäten, wobei nicht nur die extrahierbaren, schwerflüchtigen Kohlenwasserstoffe («Bitumen»), sondern auch die niedrigmolekularen Kohlenwasserstoffe (C_2 - C_7) berücksichtigt wurden. Aufgrund dieser Daten war es auch möglich, anhand von zum Teil neu entwickelten Kriterien Aussagen über Migrationsprozesse der niedrigmolekularen mobilen Kohlenwasserstoffe in dieser Bohrung zu machen.

7.2 Probematerial und Methodik

Eine Serie von 22 auf der Bohrstelle gasdicht in Dosen verpackten tiefgekühlten Kernproben von Tonschiefern und Schluffsteinen des Lias und Dogger (Tiefenintervall 24 m bis 88 m) wurde mit folgenden organisch-geochemischen Analysemethoden untersucht:

- Bestimmung des organischen Kohlenstoffgehalts der entcarbonatisierten Proben (Einwirkung von heisser 6N-HCl) mit einem LECO-IR-112-Gerät;
- Pyrolyse der Gesteinsproben zur Charakterisierung des organischen Materials nach dem Rock-Eval-Verfahren (ESPITALIÉ et al. 1977);
- Bestimmung der leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffe nach dem Wasserstoff-Elutionsverfahren (SCHAEFER et al. 1978). Die Elution bei Raumtemperatur erfasst zwangsläufig nur einen Teil der gesamten im Gestein enthaltenen niedrigmolekularen Kohlenwasserstoffe, insbesondere den im Porenwasser gelösten Anteil. Die Gesamtgehalte im erfassten Molekularbereich wären etwa um eine Zehnerpotenz höher zu veranschlagen. Die für deren Bestimmung benötigte «Thermovaporisation» (SCHAEFER et al. 1983) ist experimentell aufwendiger und wurde an der vorliegenden Probeserie nicht durchgeführt. Die durch H_2 -Elution bei Raumtemperatur gewonnenen Konzentrationsdaten sind mit denen nach anderen Analyseverfahren (z. B. Headspace-Methoden) erstellten nur schwer zu vergleichen.
- Das lösliche organische Material wurde mit Hilfe eines leicht modifizierten Schnellextraktionsverfahrens (RADKE et al. 1978) aus den feingemahlten Gesteinsproben gewonnen und durch Mitteldruck-Flüssig-Chromatographie in gesättigte und aromatische Kohlenwasserstoffe sowie Hetero-Verbindungen aufgetrennt (RADKE et al. 1980). Die gesättigten Kohlenwasserstoffe wurden in n-Heptan gelöst und mit einem Siemens-L350-Gaschromatographen analysiert (Bedingungen: 28 m Glaskapillare, 0,3 mm i. D., belegt mit Methylsilikongummi OV1; temperaturprogrammiert: Anfangstemperatur 80 °C (2 min), Heizrate 3 °C/min, 250 °C (Endtemperatur), Trägergas Helium, Splitverhältnis 1:10).

Lithologisch sind die von uns untersuchten Proben wie folgt charakterisiert (Figur 6): Die Proben aus dem Bereich des Opalinus-Tons sind mittelgraue, feinlamellierte siltige Tone bis tonige Siltsteine, diejenigen der Jurensis-Mergel sind Kalkmergel. Die einzige Probe aus dem Posidonienschiefer-Intervall ist ein dunkelgrauer, feinlamellierter bituminöser Tonmergel, während alle Proben aus dem Bereich der Obtusus-Tone tonige Siltsteine darstellen. Weitere Einzelheiten zur

lithologischen und tonmineralogischen Charakterisierung der hier untersuchten Proben sind den Kapiteln 3.3 und 4.2 zu entnehmen.

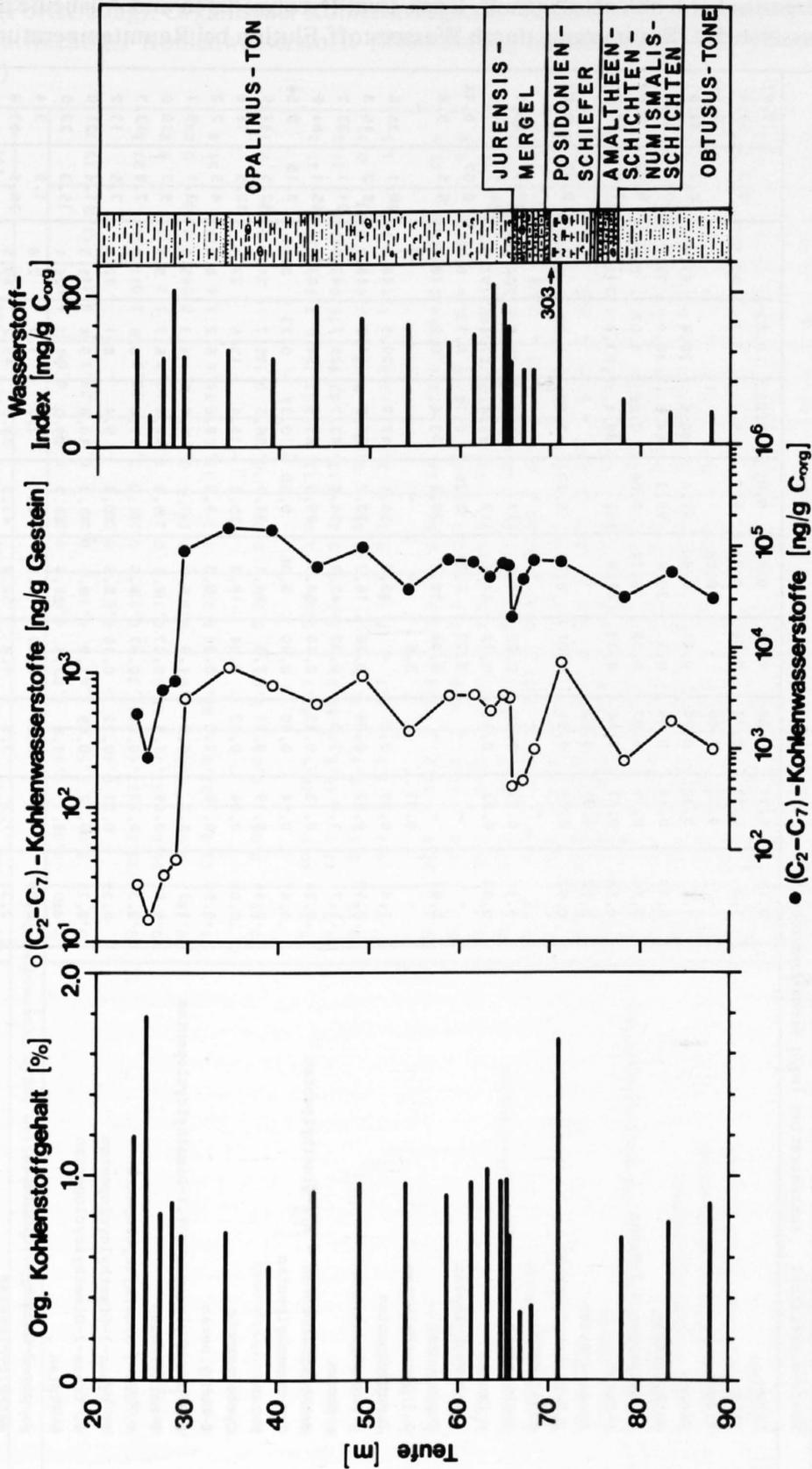
7.3 Menge und Art des organischen Materials in den Sedimenten des Lias und Dogger

Der organische Kohlenstoffgehalt der untersuchten Proben variiert zwischen 0,33 und 1,7% (Figur 6, Tabelle 18). Im Opalinus-Ton ist ein deutlicher Trend zunehmender Kohlenstoffgehalte mit der Tiefe zwischen 29,35 m und 65,43 m (von 0,7 bis ca. 1,0%) zu beobachten. Fast alle Proben (Ausnahmen in den Jurensis-Mergeln bei 66,90 m und 68,13 m) liegen demnach hinsichtlich des Kohlenstoffgehalts deutlich über dem für Erdöl-Muttergesteine klastischer Lithologie geforderten Minimalwert von 0,5% C_{org} (TISSOT and WELTE 1978). Die höchsten Kohlenstoffwerte treten auf bei den Proben aus 25,45 m (1,8%) und 71,09 m (1,7%) Tiefe. Die erstere Probe (Opalinus-Ton) enthält jedoch ein sehr wasserstoffarmes Kerogen (Typ IV nach BROOKS 1981) und besitzt damit ein sehr geringes Kohlenwasserstoffpotential (Wasserstoffindex $I_H = 20$ mg Kohlenwasserstoffe/g C_{org}). Die andere Probe aus den Posidonienschiefern kann aufgrund ihres erhöhten Wasserstoff-Index (303 mg/g C_{org}) als ein Kerogen-Typ II enthaltendes Erdölmuttergestein eingestuft werden (DURAND et ESPITALIÉ 1973; ESPITALIÉ et al. 1977). Ein ähnlich hoher Wert wird von keiner der übrigen untersuchten Proben auch nur annähernd erreicht. Wasserstoffindexwerte zwischen etwa 50 und 110 mg/g C_{org} klassifizieren das organische Material dieser Proben als Typ-III-Kerogen, d. h. als typisch für Muttergesteine mit bei entsprechender Reife ausgeprägtem Gasbildungspotential. Die Temperatur der maximalen Pyrolyseausbeute T_{max} , die als geochemischer Reifeparameter Verwendung findet (BARKER 1974; CLAYPOOL and REED 1976), zeigt über das untersuchte kurze Intervall erwartungsgemäss keine Tiefenabhängigkeit und nur eine geringe Variation von wenigen Graden um 432 °C als Mittelwert. Dieser Wert deutet auf einen relativ niedrigen Reifegrad des organischen Materials hin. Die Reife entspricht auf der Basis dieses Parameters etwa dem Beginn der Kohlenwasserstoffgenese ($R_m = 0,5\%$ für Typ-II-Kerogene). Diese Schlussfolgerung wird auch durch die Ergebnisse der Vitrinitreflexionsmessungen und der fluoreszenzmikroskopischen Untersuchungen bestätigt (Kapitel 6.4).

7.4 Menge und Zusammensetzung der niedrigmolekularen Kohlenwasserstoffe

Kohlenwasserstoffe des untersuchten Molekularbereichs (C_2 - C_7) sind weitverbreitete Spurenbestandteile in Sedimentgesteinen und stehen im Mittelpunkt zahlreicher geochemischer Untersuchungen (HUNT 1975; LE TRAN 1975; PHILIPPI 1975; THOMPSON 1979; LEYTHAEUSER et al. 1979a, b; HUNT et al. 1980). Für geochemische Fragestellungen ist das Studium dieser Verbindungen besonders aus zwei Gründen von Interesse. Einmal spiegelt der Ablauf der Genese dieser Verbindungsgruppe in empfindlicher Weise die thermisch kontrollierten diagenetischen und katagenetischen Veränderungen wieder, die das Kerogen bei Absenkung und Temperaturerhöhung erfährt. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeiten mit kürzer werdender Kettenlänge der abgespaltenen Spezies zunimmt (TISSOT et al. 1971). Zum anderen sind niedrigmolekulare Kohlenwasserstoffe wegen ihrer relativ hohen Wasserlöslichkeit sowie ihrer grossen Mobilität (beispielsweise durch molekulare Diffusion) geeignet, Kohlenwasserstoff-Migrationsprozesse in empfindlicher Weise zu verdeutlichen (THOMPSON 1979; LEYTHAEUSER et al. 1979b, 1980b, 1983; SCHAEFER et al. 1983).

Die Ausbeute der Kohlenwasserstoffe im Molekularbereich C_2 - C_7 sind für das untersuchte Tiefenintervall in Tabelle 18 zusammengestellt. Zur Illustration der starken Schwankungen sowohl hinsichtlich der Menge als auch der Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffe sind in Figur 7 die Gaschromatogramme von vier ausgewählten Proben abgebildet. Dabei gehört die Probe aus 25,45 m Tiefe zu den ganz armen, insbesondere auch gasarmen Proben. Im Gegensatz dazu enthalten die beiden Proben aus 54,16 m und 87,94 m Tiefe erhebliche Mengen an C_2 - C_7 -Kohlenwasserstoffen, wobei auch die leichten Gase stark vertreten sind. Im Gegensatz dazu ist die Probe aus 65,70 m Tiefe offensichtlich abgereichert an leichten Gasen. Der Gehalt an Kohlenwasserstoffen $> C_6$ ist mit den beiden anderen Proben allerdings durchaus vergleichbar.



Figur 6: Organischer Kohlenstoffgehalt, Ausbeute (Bestimmung durch Wasserstoff-Elution bei Raumtemperatur) leichtflüchtiger Kohlenwasserstoffe (Molekularbereich C₂-C₇, ohne Olefine, vgl. Tabelle 18) sowie Pyrolyseausbeute (Wasserstoffindices) und Lithologie (schematisch) in Kernproben.

Tabelle 18: Organischer Kohlenstoffgehalt, Rock-Eval-Pyrolysedaten und Ausbeute leichtflüchtiger Kohlenwasserstoffe (Bestimmung durch Wasserstoff-Elution bei Raumtemperatur)

Nr.	Teufe (m)						Kohlenwasserstoff Konzentration (ng/g Trockengewicht)							
	C _{org} (% Trockengewicht)	Wasserstoff-Index (mg Kohlenwasserstoffe/g C _{org})	Sauerstoff-Index (mg CO ₂ /g C _{org})	T _{max} (°C)	24,16	25,45	27,07	28,40	29,35	34,26	39,09	44,03	49,08	54,16
1					0,15	0,11	0,08	0,08	0,07	0,05	0,03	-	-	0,07
2					1,3	0,22	0,14	0,38	0,38	6,7	8,1	3,3	17,5	17,4
3					-	0,30	0,06	-	0,09	-	-	-	-	0,10
4					1,4	0,20	0,20	0,61	0,60	62,4	46,6	30,6	67,9	8,2
5					0,33	0,14	0,09	6,5	20,4	99,3	64,5	40,9	74,1	10,4
6					0,10	0,10	0,07	0,09	0,14	0,06	0,07	0,05	0,05	0,08
7					0,58	0,17	0,14	0,32	41,8	152	99,4	63,4	113	17,8
8					0,02	0,01	0,02	-	-	-	-	-	-	-
9					0,02	0,03	0,01	0,01	0,13	0,20	0,06	0,12	0,12	0,07
10					-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11					0,3	0,23	0,25	0,22	90,1	133	90,7	62,6	104	27,5
12					0,53	0,23	0,30	0,32	84,6	117	83,4	57,4	93,5	31,7
13					-	-	-	0,20	0,21	0,26	0,18	0,13	0,20	0,14
14					0,03	-	-	0,04	10,2	20,6	13,6	10,8	16,0	6,5
15					-	0,33	-	3,6	-	-	-	-	-	-
16					1,4	0,59	2,2	-	45,6	56,1	42,9	29,5	44,5	20,1
17					0,50	0,62	0,86	0,26	16,3	20,7	16,2	11,8	18,3	9,2
18					1,7	1,0	3,0	0,32	45,9	54,8	43,7	29,1	42,0	21,1
19					0,24	0,13	0,45	0,16	64,5	89,3	66,8	54,0	83,5	45,1
20					0,47	0,54	0,40	0,90	0,36	0,40	0,33	0,23	0,33	0,15
21					0,46	0,19	0,21	7,3	14,1	34,1	18,5	15,7	21,3	12,5
22					0,08	0,04	0,12	0,04	18,2	25,4	18,4	15,6	22,9	12,5
23					0,96	0,78	2,0	0,34	8,3	9,3	8,6	6,2	8,2	4,5
24					1,1	1,2	1,2	1,9	6,0	7,0	5,9	4,3	5,9	3,1
25					0,82	0,69	1,9	0,27	8,0	9,4	8,8	6,7	9,3	5,7
26					0,36	0,27	0,68	0,07	8,6	11,0	9,6	8,0	11,9	7,8
27					0,39	0,23	0,72	0,18	8,5	10,8	9,4	8,1	12,1	7,5
28					0,75	0,18	0,69	1,9	9,0	11,8	10,8	9,4	15,3	11,4
29					4,0	3,1	7,8	1,5	27,1	29,7	29,0	21,1	26,1	15,3
30					0,08	-	0,09	0,10	1,5	2,0	2,0	1,7	2,8	1,9
31					2,3	1,5	3,9	1,0	52,8	65,3	54,0	45,2	60,5	36,5
32					0,15	0,11	0,10	0,25	0,12	-	0,17	-	-	-
33					0,59	0,42	0,83	0,40	6,7	8,2	7,5	6,3	8,7	6,3
34					0,47	0,51	0,42	1,0	1,6	2,0	2,1	1,8	2,4	1,7
35					-	0,28	0,5	1,2	-	-	-	-	-	6,0
36					5,5	0,64	2,0	9,0	40,8	58,3	37,3	33,1	48,3	31,6

- = Konzentration nahe bei oder unterhalb der Nachweisbarkeitsgrenzen bzw. nicht angebar durch Peaküberlappung

Figur 6 zeigt die Variation des Gehalts an niedrigmolekularen Kohlenwasserstoffen mit der Tiefe. Sowohl in gesteinsgewichtbezogenen als auch in C_{org} -normierten Einheiten zeigt die Ausbeute einen ausgeprägten Sprung von über einer Zehnerpotenz zwischen 28,5 m und 29,4 m Tiefe, der im Bereich des Opalinus-Tons ohne erkennbaren Zusammenhang zur Lithologie auftritt. Unterhalb von 29,4 m ist der Verlauf der Ausbeute relativ konstant mit leicht fallender Tendenz zu grösseren Tiefen. Lediglich bei 66 m (Jurensis-Mergel) ist ein signifikanter Konzentrationsrückgang um etwa den Faktor drei (auf C_{org} bezogen) zu beachten. Dies könnte durch die Lithologie bedingt sein; hier treten die einzigen karbonatischen Gesteine (Kalkmergel) auf, die untersucht worden sind. Die als Erdölmuttergestein klassifizierten Posidonienschiefer zeichnen sich nicht durch einen besonders hohen Gehalt an leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffen (auf C_{org} bezogen) aus, sondern lassen sich mit den meisten Proben des Opalinus-Tons und der Obtusustone vergleichen. Relativ geringe Schwankungen über das gesamte Tiefenintervall (ausser den vier obersten Proben) erlauben die Angabe von Mittelwerten für die Kohlenwasserstoffausbeuten: 560 ng/g Gestein bzw. 69000 ng/g C_{org} . Nach unserer Erfahrung deuten diese Werte auf einen Reifegrad des organischen Materials hin, der bereits am Beginn der Ölgenese liegt. Die geschätzte Absolutkonzentration – ermittelt durch Thermovaporisation –, die diesem Mittelwert entspricht, würde bei etwa 10^6 ng/g C_{org} liegen. Diese Konzentration ist allerdings noch mindestens eine Zehnerpotenz unter dem Wert, der im Optimum der Ölgenese in einem entsprechenden Muttergestein zu erwarten ist (um 10^7 ng/g C_{org} bei einer Vitrinitreflexion $R_m = 0,8-0,9\%$ nach SCHAEFER et al. 1983). Der ausserordentlich starke Abfall der Konzentration in den obersten vier untersuchten Proben des Opalinus-Tons (24,16 m bis 28,40 m) deutet auf eine sekundäre Veränderung der Kohlenwasserstoffe durch Verwitterungsprozesse hin. Lösungsphänomene durch zirkulierende meteorische Wässer und in Verbindung damit ein mikrobieller Abbau kommen als Erklärung in Frage. Als wichtigstes Indiz dafür kann das hohe Isobutan/n-Butan-Konzentrationsverhältnis von 20 in der Probe aus 28,40 m Tiefe angesehen werden. Dieser hohe Wert ist für ein originäres durch thermokatalytischen Abbau des Kerogens entstandenes Kohlenwasserstoffgemisch völlig atypisch. Eine solch starke Bevorzugung eines verzweigten Alkans ist nur durch mikrobielle Aktivität zu erklären.

Einen ähnlichen Tiefen-Verlauf wie die Gesamt- C_2 - C_7 -Kohlenwasserstoffe in Figur 6 zeigen auch zwei ausgewählte n-Alkane (Figur 8): Propan als typische Gaskomponente und n-Hexan als Vertreter der flüssigen Kohlenwasserstoff-Fraktion. Bei einem detaillierten Datenvergleich fällt auf, dass der Konzentrationsabfall zum oberen Teil des Opalinus-Tons für Propan noch erheblich drastischer ausfällt als für n-Hexan. Aufgrund der wesentlich höheren Mobilität des Propans im Vergleich zum n-Hexan, beispielsweise bei der Diffusion (LEYTHAEUSER et al. 1980b, 1983), kann man schliessen, dass in einem durch Diffusionsverluste bedingten Abreicherungsprozess eine zusätzliche Erklärung für den gefundenen Konzentrationsabfall zu suchen ist. Auf einen derartigen Mechanismus deutet auch die Beobachtung hin, dass der starke Konzentrationsabfall für das leichter diffundierende Propan bereits in der Probe aus 29,35 m Tiefe feststellbar ist, während der entsprechende Rückgang für das n-Hexan erst bei 28,40 m auftritt. Eine entsprechende, sehr starke Abreicherung an Propan ist auch in zwei Proben aus den Jurensis-Mergeln (65,70 m und 66,90 m) zu beobachten. Der Abfall der Propanausbeute um etwa zwei Zehnerpotenzen – beim n-Hexan ist er wieder wesentlich weniger ausgeprägt – deutet auch hier auf eine bevorzugte Abreicherung der Gaskomponenten, möglicherweise durch Diffusion in höherpermeable Schichten, hin. Eine Erklärung der starken Konzentrationsvariationen durch faziell oder lithologisch bedingte Geneseunterschiede kann ausgeschlossen werden: Die unterste Probe der Jurensis-Mergel (68,13 m), die fast keine entsprechende Abreicherung zeigt, hat die gleiche Lithologie (mittelgrauer Kalkmergel) wie die beiden anderen aus den Jurensis-Mergeln untersuchten Proben. Ausserdem haben alle drei Proben ein identisches Kohlenwasserstoffpotential (Figur 6).

Bei dieser Interpretation ist allerdings eine grundsätzlich nicht ganz auszuschliessende Probenalterung während der Probenahme an der Bohrung nicht in Betracht gezogen worden. Gleichwohl müsste ein entsprechender künstlicher Abreicherungsseffekt in der beobachteten Grössenordnung mit einem erheblichen Austrocknen der Kerne verbunden gewesen sein. Das war aber

offensichtlich nicht der Fall, so dass die beobachteten Effekte mit grosser Wahrscheinlichkeit natürlichen Ursprungs sind.

Typische Tiefenabhängigkeiten für die Zusammensetzung der niedrigmolekularen Kohlenwasserstoffe sind in Figur 9 am Beispiel der C_7 -Verbindungen dargestellt. Abgesehen von den vier obersten Proben bewegt sich der mittlere Relativgehalt des n-Heptans recht einheitlich bei 14%, der verzweigten C_7 -Kohlenwasserstoffe bei 13% sowie der C_7 -alicyclischen Verbindungen bei 58% (bei steigender Tendenz mit der Tiefenzunahme). Entsprechend umgekehrt verhält sich der Toluolgehalt, der im betrachteten Tiefenintervall zwischen 5% und 26% liegt. Ein etwas erhöhter Toluolgehalt ist von 29 m bis 54 m Tiefe festzustellen (Mittelwert 23%), während er unterhalb von 58 m nur etwa 11% beträgt. Der niedrigste Wert ist in den Posidonienschiefern (71,09 m) mit 5,2% gemessen worden. Dieser Wert ist charakteristisch für Muttergesteine niedrigen Reifegrades, die ein Typ-II-Kerogen enthalten (SCHAEFER et al. 1983). Die relativ niedrigen Gehalte an n-Heptan und verzweigten C_7 -Kohlenwasserstoffen auf der einen Seite und recht hohe Gehalte an alicyclischen Verbindungen auf der anderen Seite deuten auf den relativ niedrigen Reifegrad des organischen Materials hin. Erhebliche relative Anreicherungen an Toluol sind in der Opalinus-Tonprobe aus 28,40 m Tiefe festzustellen. Dies wird ebenfalls als Folge von Verwitterungsprozessen interpretiert: meteorische Wässer, die hier von der quartären Überdeckung in die obersten Zonen des Opalinus-Tons eindringen, lösen die niedrigmolekularen Kohlenwasserstoffe aus dem Gestein heraus, wobei Toluol aufgrund seines Dipolmomentes (hohe Polarität) und die dadurch verursachte Adsorption an Tonmineraloberflächen von diesem Prozess weniger betroffen und somit relativ angereichert wird.

Aufgrund der oben diskutierten Kriterien kann also eine sich in den Opalinus-Ton bis zu einer Tiefe von 28,46 m erstreckende Zone erkannt werden, die durch Verwitterungsprozesse beeinflusst ist. Die Zusammensetzung der Fraktion der niedrigmolekularen Kohlenwasserstoffe spiegelt demnach den Einfluss von Verwitterungsprozessen in empfindlicherer Weise wider als die Minerale, die in dieser Zone des Opalinus-Tons keine Veränderungen aufweisen (Kapitel 3 und 4).

7.5 Menge und Zusammensetzung der schwerflüchtigen Kohlenwasserstoffe

Neun ausgewählte Kernproben wurden mit Dichlormethan extrahiert und die Extrakte flüssig-chromatographisch aufgetrennt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 19 dargestellt. Dabei ist zu erwähnen, dass die in der Tabelle aufgeführten organischen Kohlenstoffgehalte an den für diese Untersuchungen herangezogenen Teilproben bestimmt worden sind. Die Werte unterscheiden sich deshalb geringfügig von den in Tabelle 18 gegebenen und an einem anderen Probensatz gemessenen Daten. Die Gehalte an löslichem organischem Material liegen um oder unter 100 ppm ($\mu\text{g/g}$); nur die Posidonienschiefer, die aufgrund von Pyrolysemessungen bereits als gutes Erdöl-Muttergestein eingestuft wurden, enthalten fast 500 ppm. Die kohlenstoffnormierten Werte liegen zwischen 3,3 und 26,9 $\text{mg/g } C_{\text{org}}$ für den Gesamtextrakt bzw. 1,6 und 13,7 $\text{mg/g } C_{\text{org}}$ für die Kohlenwasserstoffe. Diese Gehalte zeigen, dass sich die Posidonienschiefer am Beginn des Erdöl-genese-Stadiums befinden. Die Proben aller übrigen Formationen haben nur ein sehr geringes Erdölbildungspotential.

Die gesättigten Kohlenwasserstoff-Fractionen wurden kapillar-gaschromatographisch analysiert. In den Chromatogrammen, von denen drei in Figur 10 ausgewählt wurden, sind erhebliche Bevorzugungen der ungeradzahligen n-Alkane im C_{25} - bis C_{35} -Bereich zu erkennen. Die daraus berechneten CPI-Werte («Carbon Preference Index»), die in den Proben aus dem Opalinus-Ton bei 1,5 bis 1,8 liegen, deuten ebenfalls auf den niedrigen Reifezustand des organischen Materials hin (Tabelle 20). Die Abnahme der CPI-Werte auf etwa 1,2 in den Posidonienschiefern hingegen ist eine Folge des Wechsels im Typ des organischen Materials zu einem Typ-II-Kerogen. Dies wird auch aus den in Figur 10 gezeigten Gaschromatogrammen der gesättigten Fraktionen deutlich. Während bei den Proben aus dem Opalinus-Ton und den Jurensis-Mergeln ein erheblicher Anteil an der Gesamtverteilung aus n- C_{27} - bis n- C_{35} -Alkanen besteht, sind diese Komponenten in den

Posidonienschiefern nur in geringem Masse vorhanden. Das deutet auf eine anders geartete Herkunft des organischen Materials in diesem Muttergestein hin: Ein höherer Anteil an Phytoplankton und Algenmaterial und ein kleinerer Beitrag von höheren Landpflanzen können für die Bildung des Kerogens in den Posidonienschiefern angenommen werden. Die aus Pyrolysedaten abgeleitete Schlussfolgerung einer guten Kerogenqualität in dieser Probe wird somit durch die Detailzusammensetzung der n-Alkane bestätigt.

7.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der verschiedenen organisch-geochemischen Analysen an Kernproben lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der organische Kohlenstoffgehalt der Proben liegt zwischen 0,33 und 1,7%, wobei Werte unter 0,5% nur in zwei Proben der Jurensis-Mergel angetroffen werden. Alle übrigen Proben weisen einen zum Teil beträchtlich über dem für Muttergesteine klastischer Lithologien geforderten Minimalwert liegenden Kohlenstoffgehalt auf.
- Ein ausgeprägtes Ölbildungspotential (Kerogentyp II) hat lediglich die eine untersuchte Probe (71,09 m) aus dem Posidonienschiefer-Intervall. Das organische Material aller übrigen Proben ist wesentlich wasserstoffärmer (Kerogentyp III bzw. IV).
- Die Gehalte an leichtflüchtigen (C_2 - C_7) und höhermolekularen ($\geq C_{15}$) Kohlenwasserstoffen deuten auf einen Reifegrad des organischen Materials hin, der am Beginn der Ölgeneese liegt. Dieses wird durch die Pyrolysedaten (T_{max}) bestätigt.
- Die obersten 4,2 m des Opalinus-Tons (24,16–28,40 m) sind aufgrund der Menge und Zusammensetzung der leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffe starken Verwitterungsprozessen durch meteorische Wässer ausgesetzt. Insofern scheint die C_2 - C_7 -Kohlenwasserstoff-Fraktion einen empfindlicheren Indikator für diese Prozesse darzustellen als die Minerale, die in dieser Zone des Opalinus-Tons keine Veränderungen aufweisen.
- Anzeichen für Kohlenwasserstoff-Umverteilungsprozesse durch Diffusion sind für die leichten Gase insbesondere an der Oberkante des nicht verwitterten Opalinus-Ton-Intervalls (etwa bei 29 m) festgestellt worden. Migration im erdölgeologischen Sinn, beispielsweise auch der schwerflüchtigen Kohlenwasserstoffe, fand im untersuchten Tiefenintervall dieser Bohrung nicht statt.

Danksagung

Die Autoren danken Herrn Dr. M. Radke für die Extraktions- und Flüssig-Chromatographie-Daten sowie Herrn Dr. J. Gormly für die Kohlenstoffmessungen und die Rock-Eval-Pyrolyseergebnisse. Für intensive Hilfe bei der Ausführung und Auswertung der Analysen sei insbesondere auch den folgenden Mitarbeitern unseres Instituts gedankt: Frau M. Derichs und Frau B. Winden sowie den Herren U. Disko, H. Pooch, K. Otterberg, B. Schmidl und H. Willsch.

Tabelle 19: Gehalt und Zusammensetzung des löslichen organischen Materials (C₁₅₊) ausgewählter Kernproben

1	2	3	4	5	6	7	8
24,16	0,95	90	9,5	5,0	20,0	32,9	47,1
34,26	0,81	55	6,8	5,2	46,3	29,6	24,1
49,08	1,28	98	7,7	4,1	17,2	36,8	46,0
61,45	1,23	47	3,8	1,7	15,9	27,3	56,8
63,23	0,99	117	11,8	6,3	17,3	35,6	47,1
65,43	1,10	125	11,4	5,8	16,2	35,1	48,7
65,70	0,81	73	9,0	4,3	13,8	33,8	52,4
71,09	1,79	482	26,9	13,7	22,2	28,8	49,0
87,94	0,85	28	3,3	1,6	15,0	35,0	50,0

Legende:

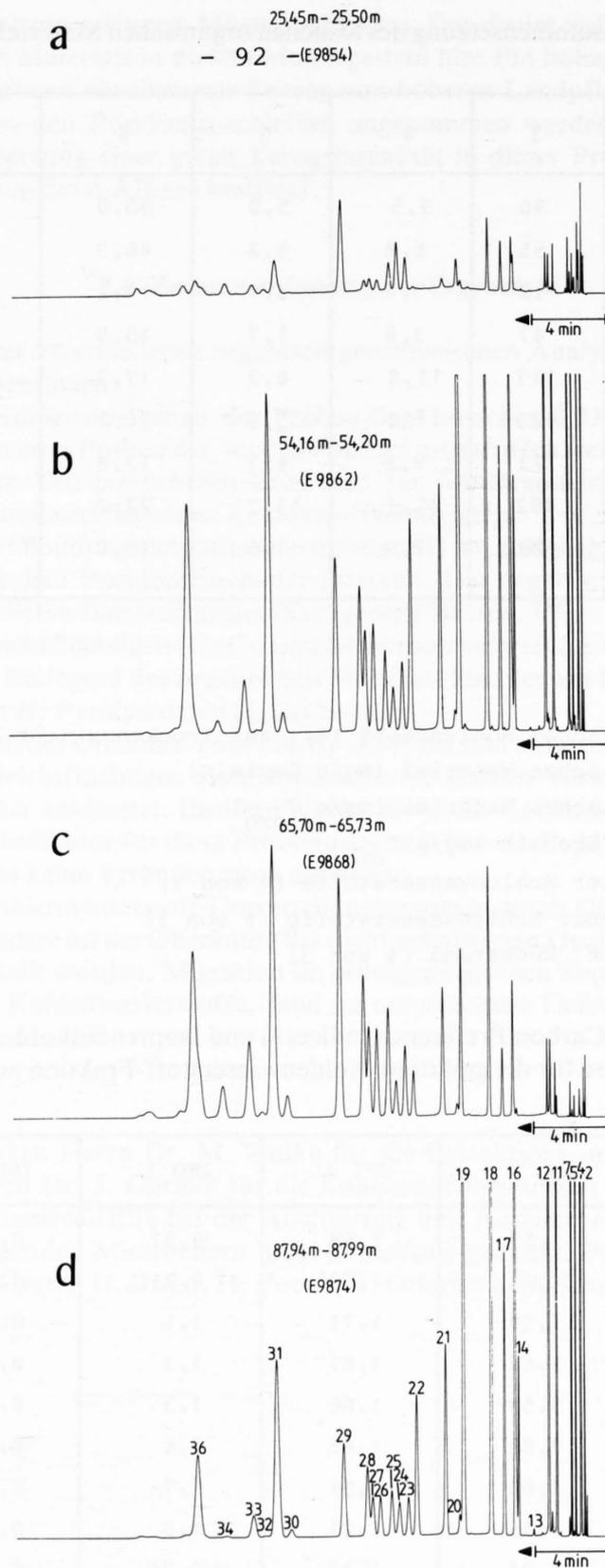
- 1 = Tiefe (m)
- 2 = Gehalt an organischem Kohlenstoff (%), auf Trockengewicht bezogen
- 3 = lösliches organisches Material ($\mu\text{g/g}$ Gestein)
- 4 = lösliches organisches Material ($\text{mg/g C}_{\text{org}}$)
- 5 = Kohlenwasserstoffgehalt ($\text{mg/g C}_{\text{org}}$)
- 6 = Anteil gesättigter Kohlenwasserstoffe (% von 3)
- 7 = Anteil aromatischer Kohlenwasserstoffe (% von 3)
- 8 = N,S,O-Komponenten, Rückstand (% von 3)

Tabelle 20: CPI-Werte («Carbon Preference Indices») und Isoprenoidkohlenwasserstoff-Konzentrationsverhältnisse für die gesättigte Kohlenwasserstoff-Fraktion ausgewählter Kernproben

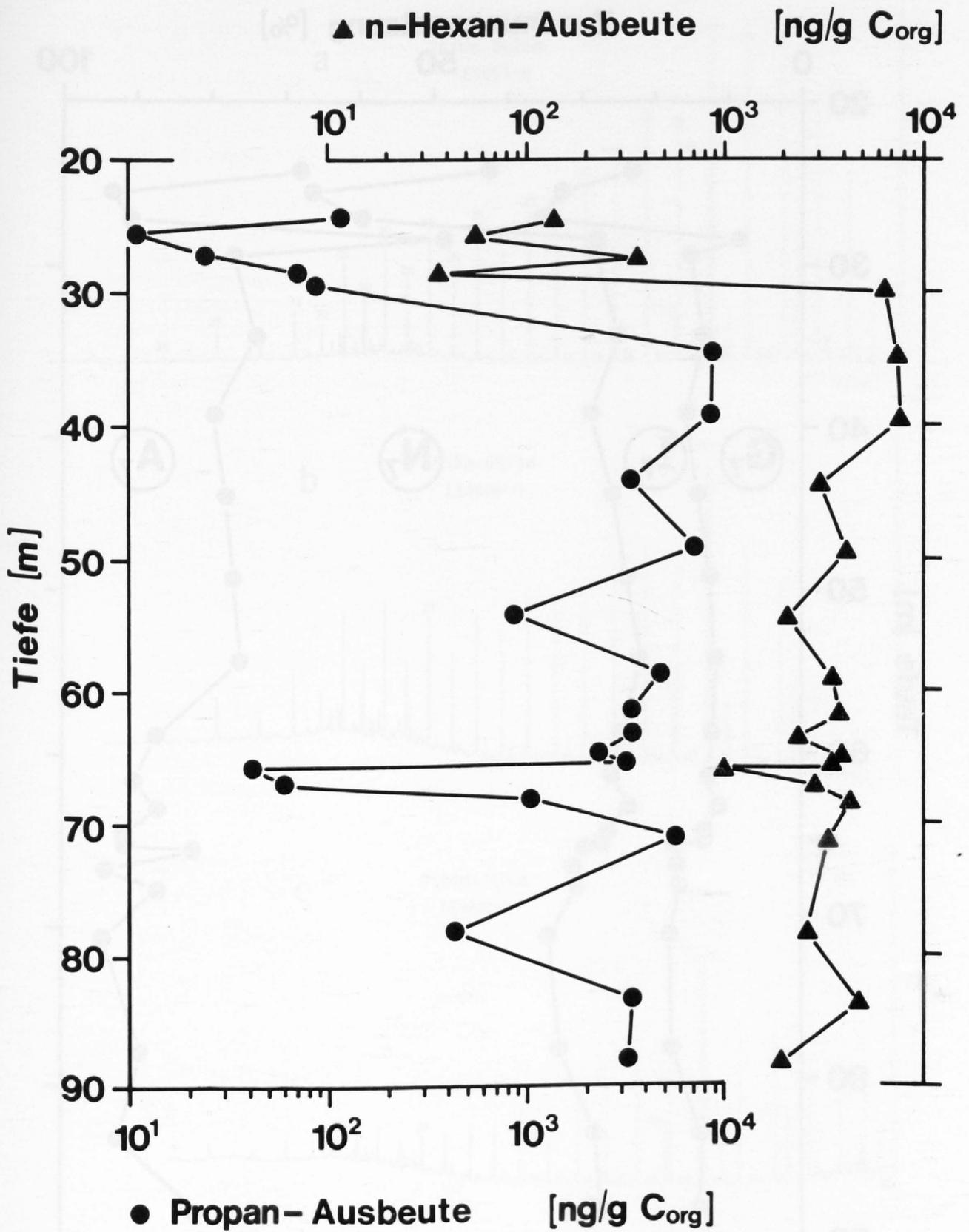
Tiefe (m)	CPI 1	CPI 2	ISO 1	ISO 2	ISO 3
24,16	1,57	1,68	0,91	0,32	4,0
34,26	1,63	1,77	0,71	0,27	3,8
49,08	1,59	1,71	1,1	0,49	3,0
61,45	1,55	1,67	1,3	0,47	3,5
63,23	1,52	1,66	1,3	0,44	4,1
65,43	1,52	1,68	1,4	0,56	3,4
65,70	1,60	1,81	1,7	0,56	4,0
71,09	1,16	1,21	1,5	0,76	3,8
87,91	1,31	1,47	0,74	0,22	3,5

Legende:

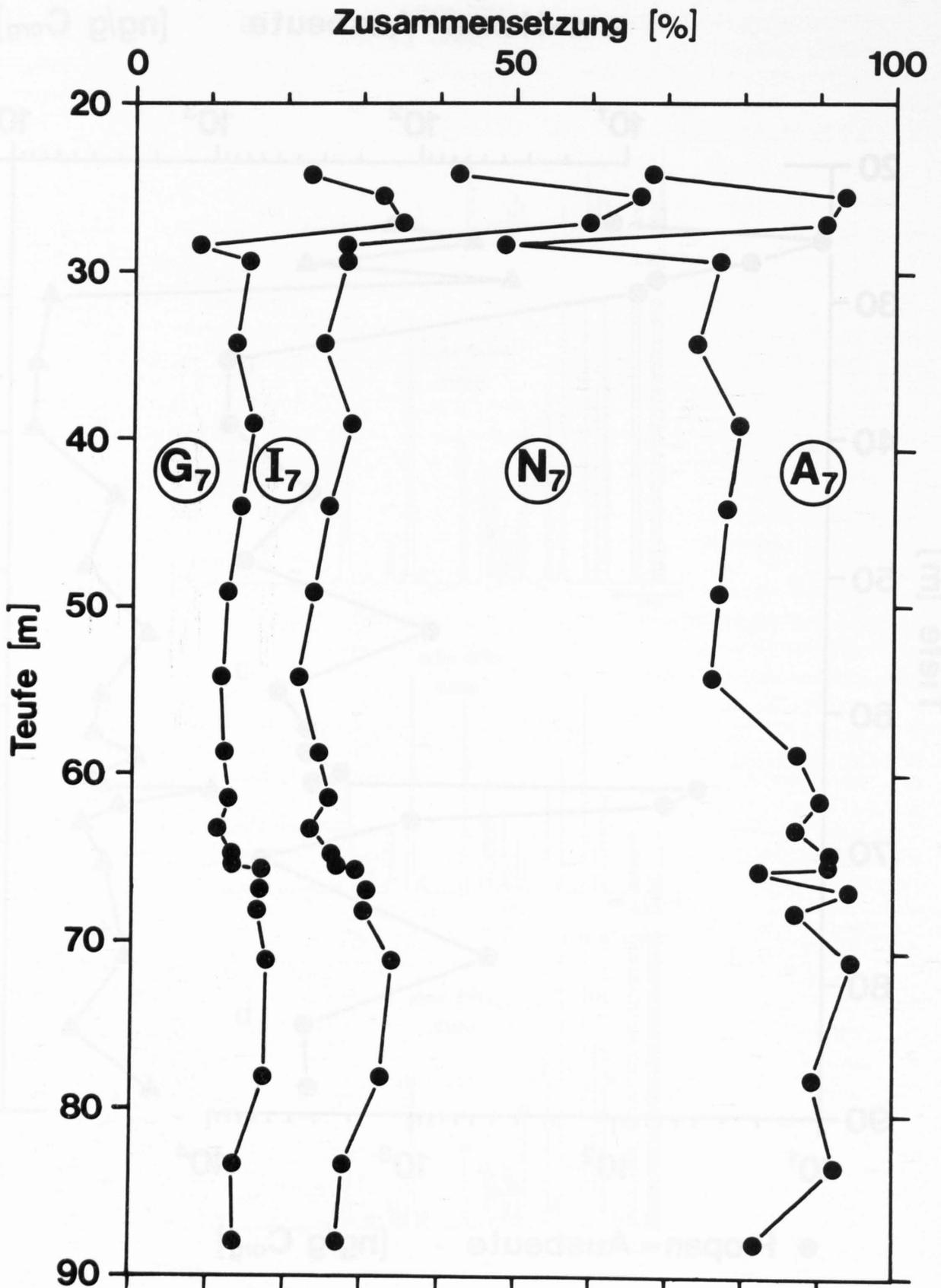
- CPI 1 = CPI₂₅₋₃₁
- CPI 2 = CPI₂₉
- ISO 1 = Pristan/n-Heptadecan
- ISO 2 = Phytan/n-Octadecan
- ISO 3 = Pristan/Phytan



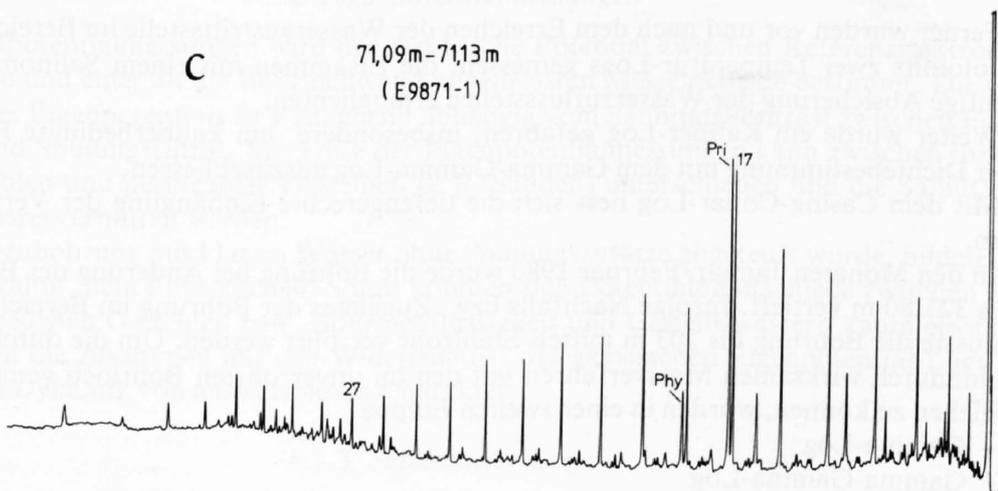
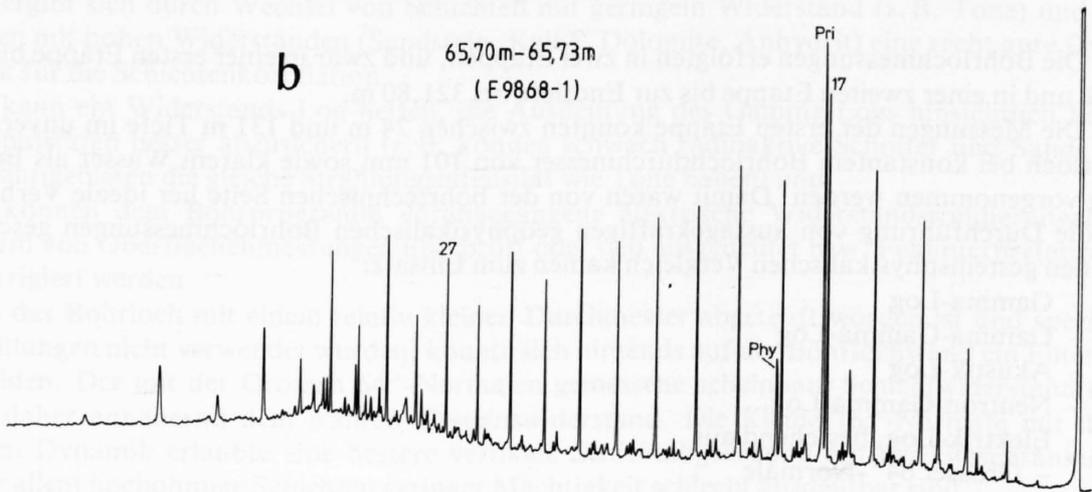
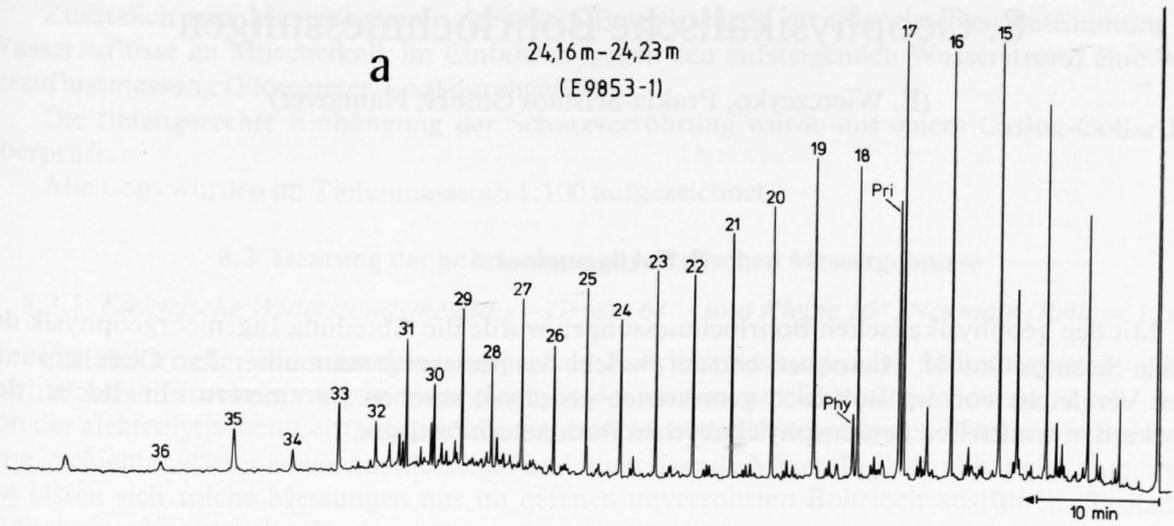
Figur 7: Kapillar-Gas-Chromatogramme der leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffe ausgewählter Kernproben.
a = Opalinus-Ton, b = Opalinus-Ton (unterster Teil - Lias), c = Jurensis-Mergel, d = Obtusus-Ton
Identifizierung der Komponenten (Zeitachse von rechts nach links) nach Tabelle 18



Figur 8: Propan- und n-Hexanausbeute (Bestimmung durch Wasserstoff-Elution bei Raumtemperatur) in Kernproben.



Figur 9: Zusammensetzung der C₇-Kohlenwasserstoffe (G₇ = n-Heptan, I₇ = acyclisch verzweigt, N₇ = alicyclisch, A₇ = Toluol, als Summe, normiert auf 100%, dargestellt von links nach rechts) in Kernproben.



Figur 10: Kapillar-Gaschromatogramme der gesättigten Kohlenwasserstoff-Fraktion ausgewählter Kernproben. a = Opalinus-Ton, b = Jurensis-Mergel, c = Posidonienschiefer. n-Alkane sind durch ihre Kohlenstoffzahl markiert; Pri = Pristan, Phy = Phytan; Zeitachse von rechts nach links.

8. Geophysikalische Bohrlochmessungen

(E. Wierczyko, Prakla-Seismos GmbH, Hannover)

8.1 Allgemeines

Mit den geophysikalischen Bohrlochmessungen wurde die Abteilung Ingenieurgeophysik der Prakla-Seismos GmbH, Hannover, betraut, welche das Messprogramm unter dem Gesichtspunkt eines Vergleichs von im Bohrloch gemessenen geophysikalischen Parametern mit den an den Bohrkernen ermittelten gesteinsphysikalischen Parametern festlegte.

8.2 Durchführung der Vermessung

Die Bohrlochmessungen erfolgten in zwei Etappen, und zwar in einer ersten Etappe bis 131 m Tiefe und in einer zweiten Etappe bis zur Endtiefe bei 321,80 m.

Die Messungen der ersten Etappe konnten zwischen 24 m und 131 m Tiefe im unverrohrten Bohrloch bei konstantem Bohrlochdurchmesser von 101 mm sowie klarem Wasser als Bohrspülung vorgenommen werden. Damit waren von der bohrtechnischen Seite her ideale Verhältnisse für die Durchführung von aussagekräftigen geophysikalischen Bohrlochmessungen geschaffen. Für den gesteinsphysikalischen Vergleich kamen zum Einsatz:

- Gamma-Log
- Gamma-Gamma-Log
- Akustik-Log
- Neutron-Gamma-Log
- Elektrik-Log, bestehend aus
 - Grosser 64"-Normale
 - Kleiner 16"-Normale
 - Eigenpotentialmessung (SP-Log)

Ferner wurden vor und nach dem Erreichen der Wasseraustrittsstelle im Bereich des Gansinger-Dolomits zwei Temperatur-Logs gemessen, die zusammen mit einem Salinometer-Log eine eindeutige Absicherung der Wasserzuflussstellen ermöglichten.

Weiter wurde ein Kaliber-Log gefahren, insbesondere, um kaliberbedingte Fehldeutungen bei der Dichtebestimmung mit dem Gamma-Gamma-Log auszuschliessen.

Mit dem Casing-Collar-Log liess sich die tiefengerechte Einhängung der Verrohrung überprüfen.

In den Monaten Januar/Februar 1980 wurde die Bohrung bei Änderung der Bohrdurchmesser bis 321,80 m vertieft. Infolge Nachfalls bzw. Zugehens der Bohrung im Bereich der Gipskeuper musste die Bohrung bis 203 m mittels Stahlrohr verrohrt werden. Um die durch Stahlverrohrung hindurch wirksamen Messverfahren mit den im unverrohrten Bohrloch gemessenen Daten vergleichen zu können, wurden in einer zweiten Etappe

- Gamma-Log
- Gamma-Gamma-Log
- Neutron-Gamma-Log sowie
- Temperatur-Log

bis zur bzw. von der Erdoberfläche aus gefahren. Die Elektrik-Logs sowie das Akustik-Log konnten nur im unverrohrten Teil unterhalb 203 m gemessen werden. Das gleiche gilt für Kaliber-Log und Salinometer-Log.

Zusätzlich zum Messprogramm der ersten Etappe wurde zur quantitativen Bestimmung der Wasserzuflüsse im Muschelkalk im Einfahren (gegen den aufsteigenden Wasserstrom) eine Wasserzuflussmessung (Flowmeter-Log) durchgeführt.

Die tiefengerechte Einhängung der Schutzverrohrung wurde mit einem Casing-Collar-Log überprüft.

Alle Logs wurden im Tiefenmasstab 1:100 aufgezeichnet.

8.3 Deutung der bohrlochgeophysikalischen Messergebnisse

8.3.1 Elektrische Widerstandsmessung – Grosse 64" - und Kleine 16" -Normale (Beilage 12)

Für elektrische Widerstandsmessungen als Bohrlochmessungen im Sedimentgestein gelten zwei wichtige Einschränkungen. Zum einen ist der gemessene elektrische Widerstand sehr stark von der elektrolytischen Leitfähigkeit aller im Bohrlochbereich anwesenden Wässer wie Bohrspülung, Schichtenwässer sowie ausfliessende und aufsteigende Mineralwässer abhängig, zum anderen lassen sich solche Messungen nur im offenen unverrohrten Bohrloch ausführen. Trotzdem können sie sehr nützlich sein, denn

- es ergibt sich durch Wechsel von Schichten mit geringem Widerstand (z. B. Tone) und solchen mit hohen Widerständen (Sandstein, Kalke, Dolomite, Anhydrit) eine recht gute Dynamik für die Schichtenkorrelation,
- es kann ein Widerstands-Log helfen, die Ausdeutung des Gamma-Logs hinsichtlich hoher Impulsraten besser abzusichern (z. B. können schwach radioaktive Schotter und Sande aus Grantgebieten die gleiche Strahlungsintensität wie Tone haben) und
- es können dem Bohrprogramm vorangegangene elektrische Widerstandssondierungen in Form von Oberflächenmessungen überprüft oder neu ausgedeutet bzw. Fehlinterpretationen korrigiert werden.

Da das Bohrloch mit einem relativ kleinen Durchmesser abgeteuft worden ist und spezielle Bohrspülungen nicht verwendet wurden, konnte sich nirgends auf der Bohrlochwand ein Filterkuchen bilden. Der mit der Grossen 64"-Normalen gemessene scheinbare Schichtwiderstand entspricht daher annähernd dem wahren Gesteinswiderstand. Die Kleine 16"-Normale mit ihrer grösseren Dynamik erlaubte eine bessere vertikale Schichtabgrenzung mit der Einschränkung, dass vor allem hochohmige Schichten geringer Mächtigkeit schlecht ausdeutbar sind.

8.3.2 Eigenpotentialmessungen

Bei Eigenpotentialmessungen wird das elektrische Potential zwischen Referenzelektrode an der Oberfläche und einer an die Bohrlochwand angepressten Messelektrode bestimmt. Die Größenordnung des Eigenpotentials ist weitgehend abhängig vom Salinitätskontrast zwischen Formationswasser und Spülungsfiltrat. Mit Hilfe der Eigenpotentialmessungen kann zwischen tonigen, wenig permeablen und permeablen Gesteinen (z. B. Sanden) unterschieden und die Salinität des Formationswassers ermittelt werden.

Da die Kernbohrung mit klarem Wasser ohne Spülungszusätze abgeteuft wurde, bildete sich, wie bereits erwähnt, kein Filterkuchen. Somit konnten sich Potentialunterschiede zwischen lithologisch verschiedenen Gesteinen bzw. Bohrlochflüssigkeit und Gesteinswässern kaum einstellen. Dadurch zeigen die zusammen mit den Widerstands-Logs gemessenen Eigenpotential-Logs (SP-Logs) keinerlei Dynamik von auswertbarem Charakter.

8.3.3 Salinometer-Log

Die kontinuierliche, tiefenabhängige Messung der elektrischen Leitfähigkeit der Flüssigkeitssäule in der Bohrung hat sich als eine sehr nützliche Hilfe beim Auffinden der mineralisierten Zuflüsse aus dem durchteuften Gebirge erwiesen. Insbesondere ist die messtechnische Auflösbarkeit durch Registrieren von Logs in zwei verschiedenen empfindlichen Messbereichen verblüffend (Beilage 14).

Für die artesisch aufsteigenden Muschelkalkwässer bzw. die ruhende Wassersäule liessen sich folgende Leitfähigkeitswerte ableiten:

Tiefe (m)	Leitfähigkeit (S/cm)
220	8177
240	8035
280	8012
291	7902
300	7815
321	5089

8.3.4 Gamma-Log (Beilagen 11 und 15)

Das Gamma-Log gibt in tiefenabhängig kontinuierlicher Darstellung die Anzahl der pro Zeiteinheit auf einer Messtiefe gemessenen elektrischen Impulse (Impulse pro Minute) wieder, die einem statistischen Mittelwert der beim spontanen radioaktiven Zerfall freigewordenen und vom Kristall des Szintillationszählers der Messsonde erfassten Gamma-Quanten entsprechen.

Grosse Änderungen hinsichtlich der Intensität in der Gamma-Kurve sind im allgemeinen eindeutig, geringere hingegen können sowohl auf schwache Änderungen in der Radioaktivität als auch durch den spontanen radioaktiven Zerfall bedingte statistische Fluktuationen zurückgeführt werden. Im Gamma-Log für den Tiefenbereich zwischen 20 m und 66 m (Beilage 15) ist für den Opalinus-Ton der mögliche mittlere statistische Fehler, wie er aus einer Standregistrierung ermittelt wurde, beidseitig der Kurve der mittleren Strahlungsintensität eingezeichnet. Beim benutzten Messbereich von 5000 Impulsen pro Minute beträgt er immerhin ± 250 Imp/min. Maximale Fehler von 500 Imp/min, wie die beiden negativen Anomalien bei 34,8 m und 58,5 m, sind möglich. Ihre Eindeutigkeit kann nur durch mehrere zeitlich versetzte Registrierungen abgesichert werden.

In den meisten Sedimenten sind alle drei strahlenden Elemente – Uran, Thorium und Kalium 40 – am radioaktiven Zerfall beteiligt, jedoch überwiegt in bezug auf den Anteil an Gammastrahlung das Kaliumisotop bei weitem. Dies bedeutet, dass das Gamma-Log einerseits ein direktes Mass für den Kalium-Anteil im Gestein ist. Andererseits kann es aber auch ein Mass hinsichtlich der Korngrösse des anstehenden Gesteins sein, da mit Kleinerwerden der Gesteinspartikel die spezifische Oberfläche zunimmt und so eine erhöhte Adsorption von Uran und Thorium durch die pelitischen Tonpartikel gegeben ist. In Beilage 15 ist die nach der Tiefe zunehmende Gammaaktivität des Logs durch die Zunahme des K_2O -Gehalts erklärbar, obwohl die gleichzeitige Zunahme des Al_2O_3 -Gehalts nach der Tiefe auch die Möglichkeit der Adsorption zulässt, sofern die Al_2O_3 -Tonpartikel nur klein genug sind.

Hinsichtlich Bestimmung der Lithologie und stratigraphischer Korrelation ist das Gamma-Log das Fundamental-Log, sofern es entsprechend vorsichtig und möglichst unter Hinzuziehung weiterer geophysikalischer Parameter ausgedeutet wird. Wichtigster Vorteil eines Gamma-Logs ist, dass es ohne wesentliche Einbusse in der Dynamik auch durch die Wandung einer Stahlverrohrung gemessen werden kann.

Das im Ausfahren mit 2 Meter pro Minute gefahrene Gamma-Log erlaubt eine sehr klare Schichtabgrenzung, wie ein Vergleich der Kernbeschreibung bzw. der fotografierten Kerne mit dem Log zeigt. Eine Schichtgrenze im Gamma-Log ist immer dann gegeben, wenn, von unten nach oben gesehen, eine reale Intensitätsänderung nach links oder rechts beginnt, die über die mittleren statistischen Schwankungen hinausreicht. Diese Auswertemethode gilt auch für die anderen radiometrischen Verfahren wie Gamma-Gamma- und Neutron-Gamma-Log. Eine Übersichtsauswertung des zwischen Erdoberfläche und 203 m durch die Verrohrung gemessenen Gamma-Logs im Massstab 1:1000 (Beilage 11) zeigt, dass wichtige lithologische Änderungen wie Ton-

stein zu Dolomit, Kalk oder Anhydrit deutlich erkennbar sind. Unter Zuhilfenahme des Original-Logs im Massstab 1:100 sind aber auch kleinere Schichtänderungen ausdeutbar.

Hinzuweisen ist noch auf die im unverrohrten Bohrloch gemessenen relativ hohen Gammastrahlenintensitäten mit über 6000 Imp/min im oberen Lias, die durch kaliumhaltigen Glaukonit bedingt sein dürften, und fast 9000 Imp/min im Grenzbereich Schilfsandstein zu Gipskeuper (Beilage 16).

8.3.5 Gamma-Gamma-Log

Beim Gamma-Gamma-Verfahren werden von einer ^{137}Cs -Quelle Gamma-Quanten in das Gebirge abgestrahlt. Gemessen wird die sekundäre Gamma-Rückstrahlung (Compton-Streuung) aus der näheren Umgebung der Bohrlochwand. Bei gleichmässiger Bohrlochgeometrie ist die Intensität der Gamma-Rückstrahlung ein direktes Mass für die Bruttodichte (bulk density) der Formation, da bei einem gewissen konstanten Abstand (spacing) zwischen Gamma-Quelle und Gamma-Detektor die Intensität der gestreuten Gamma-Strahlung mit zunehmender Gesteinsdichte abnimmt. Die Eindringtiefe der Gamma-Quanten ins Gebirge ist relativ gering. Von der gesamten Gamma-Gamma-Intensität werden etwa 70% auf den ersten 5 cm zurückgestreut. Dadurch reagieren Gamma-Gamma-Messungen auf sprunghafte Kaliberänderungen, die durch Ausbrüche aus der Bohrlochwand bedingt sind, besonders stark und müssen korrigiert werden. Für die Darstellung der Gamma-Gamma-Logs in Beilage 111 im Tiefenmassstab 1:1000 wurden diese Korrekturen berücksichtigt.

Für den Opalinus-Ton werden von Terrexpert AG Dichtwerte um $2,43 \text{ g/cm}^3$ angegeben. Das korrigierte Gamma-Gamma-Log nimmt zwischen 29 m (Untergrenze der seismischen Verwitterung) und 65,70 m (Basis Opalinus-Ton) von 205 000 Imp/min auf 200 000 Imp/min ab, d. h., es lässt sich nach dem Log eine geringfügige gleichmässige Dichtezunahme nach der Tiefe interpretieren. Unter dem Gesichtspunkt der chemischen Zusammensetzung kann eine solche Dichteänderung nach der Tiefe durch die Zunahme des Tonmineralienanteils Al_2O_3 begründet werden (siehe Darstellung Gew.-% Al_2O_3 in Beilage 15).

Als deutliche Auslenkungen zu höherer Dichte machen sich die kalkigen Mergel zwischen 65,7 m und 69,9 m bzw. 75,7 m und 77,0 m sowie der sandige, glimmerhaltige Mergel zwischen 90,3 m und 90,9 m Tiefe bemerkbar.

Besonders herausgehoben wird der Gansinger-Dolomit, dessen harte Dolomite bei etwa 105 m Tiefe auf Impulsraten um 180 000 Imp/min zurückgehen. Rechnerisch bedeutet dies eine Impulsratendifferenz von 20 000 bis 25 000 Imp/min zwischen dem Opalinus-Ton und dem Gansinger-Dolomit. Für den härtesten Teil des Gansinger-Dolomits könnte sich ein Dichtewert um $2,57 \text{ g/cm}^3$ ergeben. Hinweisenswert ist die kleine, infolge zu geringer Mächtigkeit nicht voll entwickelte Impulsratenzunahme zwischen 106,60 m und 106,90 m Tiefe, die identisch mit der Wasserzuflussstelle im Gansinger-Dolomit ist.

Das Gamma-Gamma-Log der zweiten Messetappe wurde für den Bereich von Endtiefe bis 203 m in einem Bohrloch mit reduziertem Bohrdurchmesser (76 mm statt 101 mm) gefahren, so dass ein absoluter Vergleich von Impulsrate und Dichte mit den Ergebnissen der ersten Messetappe nicht möglich ist. Für den Bereich von 130 m bis 203 m lässt sich insbesondere bei Mitverwertung von Gamma- und Neutron-Gamma-Log eine Interpretation durchaus durchführen und für die Bereiche abnehmender Impulsraten (= zunehmender Dichte) eine Dichteabschätzung vornehmen. Bei starken Auslenkungen zu höheren Impulsraten hingegen muss die Frage offenbleiben, ob unbekannte Ausbrüche aus der Bohrlochwand die Ursache für die Dichteverringerung sind.

Für die Deutung des im unverrohrten Bohrloch zwischen Endtiefe und 203 m gemessenen Logs standen 6 Dichtebestimmungen des Geologischen Instituts der Universität Bern zur Verfügung, die bei dem entsprechenden Tiefenbereich als ρ_1 bis $\rho_{5,6}$ im Log (Beilage 16) eingetragen wurden. Dabei passen die Dichten $\rho_2 = 2,52 \text{ g/cm}^3$ für Dolomit, $\rho_3 = 2,70 \text{ g/cm}^3$ für Kalke und $\rho_{5,6} = 2,90$ bzw. $2,91 \text{ g/cm}^3$ für Anhydrit sehr gut zur gemessenen Gamma-Gamma-Kurve. Sie konnten daher für die Erstellung der eingetragenen Dichteskala herangezogen werden.

Nicht erklärt werden können die Dichtewerte $\rho_1 = 2,26 \text{ g/cm}^3$ und $\rho_4 = 2,13 \text{ g/cm}^3$. ρ_1 liegt auf dem Log in einem Bereich einer eindeutigen Impulsratenzunahme von 75000 Imp/min nach 105000 Imp/min, die, wie das daneben dargestellte Kaliber-Log zeigt, durch keinerlei Kaliberänderungen beeinträchtigt ist. Der für die Tiefe der Dichteprobe ρ_1 repräsentative Log-Dichtewert $\rho_{\text{LOG } 1}$ liegt bei $2,65 \text{ g/cm}^3$. Dieser Log-Wert fügt sich gut in die für dolomitisches Gestein typischen Werte ein.

Der Dichtewert $\rho_4 = 2,13 \text{ g/cm}^3$ liegt ebenfalls in einem Tiefenbereich mit regelmässigem Kaliberverlauf, so dass ρ_{LOG} keinerlei Einschränkungen unterliegt. Der aus dem Log ablesbare Dichtewert $\rho_{\text{LOG } 4} = 2,60 \text{ g/cm}^3$ entspricht durchaus dem geologischen Profil dieses Bereichs, bestehend aus porösem, feinkristallinem, laminiertem Dolomit mit Hornsteinknollen, Anhydrit-einschlüssen und teilweise Rahwacken (Beilage 3).

Zusammenfassend scheinen die aus den Gesteinsproben ermittelten Dichtewerte ρ_1 und ρ_4 nur im Rahmen einer Feingliederung gültig zu sein. Dichtewerte, wie sie aus dem Log abgeleitet werden, scheinen hingegen repräsentativer Durchschnitt für einen grösseren Tiefenbereich zu bedeuten.

8.3.6 Neutron-Gamma-Log

Mittels Aussenden von schnellen Neutronen im Bohrloch unter Verwendung einer Neutronenquelle (Americium-Beryllium) kann bei kontinuierlichem Messen die im näheren Bereich der Bohrlochwand durch abgebremste Neutronen erzeugte sekundäre Gammastrahlung aufgezeichnet werden. Die Intensität der sekundären Gammastrahlung ist im Normalfall von der Konzentration von Wasserstoff im anstehenden Gebirge abhängig. Indirekt ist damit das Neutron-Gamma-Log ein Mass für die Durchfeuchtung des durchbohrten Gebirges. Bei gleichbleibender Zusammensetzung der Gesteinsmatrix ist in süsswasserführenden Schichten auch eine Porositätsbestimmung bzw. eine Bestimmung des Kluftvolumens möglich.

Die mit einer möglichst schwachen Neutronenquelle und relativ geringer Geschwindigkeit von 2 m/min gefahrenen Neutron-Gamma-Logs enthalten neben der eigentlichen Neutron-Gamma-Strahlung auch einen nicht zu vernachlässigenden Anteil an natürlicher Gammastrahlung. Deswegen müssen die im gleichen Bohrloch gemessenen mittleren Impulsraten des Gamma-Logs von den gemessenen Impulsraten des Neutron-Gamma-Logs tiefengerecht subtrahiert werden. Hieraus entsteht dann das wahre Neutron-Gamma-Log, wie in der Beilage 12 zusammen mit dem Elektrik-Log 16"- und 64"-Normale wiedergegeben.

In der für diese Messungen verwendeten Sondenkonfiguration mit einem Abstand (spacing) zwischen Gammastrahlendetektor und Neutronenquelle von 60 cm nimmt die Neutronendichte mit steigendem Wasserstoffgehalt des umgebenden Gesteins ab. Von niedrigen zu steigenden Impulsraten kann folgende grobe Gesteinseinteilung gegeben werden: Ton - Tonstein - Gips - Mergel - Sandstein - Kalkstein - Dolomit - Anhydrit.

Ähnlich wie beim Gamma-Log lassen sich Neutron-Gamma-Logs ohne grössere Einbusse an Dynamik sowohl im unverrohrten Bohrloch als auch durch die Wandung einer Stahlverrohrung messen. Beilage 12 zeigt eine verblüffende Übereinstimmung im Kurvenverlauf zwischen Neutron-Gamma-Log und Elektrik-Log 16"- und 64"-Normale mit der Tendenz einer schärferen Dynamik beim Neutron-Gamma-Log.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mit dem Neutron-Gamma-Log die Widerstands-Logs 16"- und 64"-Normale durchaus ersetzt werden können. Da das Neutron-Gamma-Log auch in einer verrohrten Bohrung gemessen werden kann, bietet sich mit Gamma-Log, Neutron-Gamma-Log und zusätzlich auch Gamma-Gamma-Log eine bohrlochgeophysikalische Messkombination an, die in vielen Fällen teures Kernen sowie «Zum-Stehen-Bringen» von brüchigem Gestein überflüssig macht, aber trotzdem eine sichere Schichtenkorrelation ermöglicht. Bei Rotary-Spülbohrgeräten, die Bohrgestänge mit einem Innendurchmesser mehr als 50 mm verwenden, ist die obige Messkombination als besonders rationell angezeigt.

8.3.7 Akustik-Log

Mit dem Akustik-Log wird die Bohrlochwand mit Hilfe von Ultraschall vermessen, um die Kompressionswellen- (P-Wellen) und soweit möglich auch die Schwerwellengeschwindigkeit (S-Wellen) zu bestimmen. Dabei werden die P-Wellen-Einsätze alle 0,25 m registriert. Gleichzeitig wird das gesamte Signalbild, z. B. zwecks Erkennen und Auswerten von S-Wellen-Einsätzen, Amplitudenhöhe und Frequenzinhalt, alle 0,50 m auf Polaroidfilm fotografiert.

Das Akustik-Log kann als das wichtigste und in der Interpretationsmöglichkeit als das vielseitigste bohrlochgeophysikalische Messverfahren angesehen werden. In der «Normalausführung» ergeben sich durch Messen der Intervallzeiten der Ersteinsätze der Longitudinalwelle in Mikrosekunden pro Meter ($\mu\text{s}/\text{m}$) reziproke Geschwindigkeitswerte, die für die verschiedenen Gesteine charakteristisch sind. In der Übersichtsdarstellung (Beilage 11) sind für das Akustik-Log alle Geschwindigkeitswerte über 4000 m/s durch eine Rasterung hervorgehoben. Es zeigt sich, dass diese Bereiche sowohl bei der ersten als auch bei der zweiten Messetappe den sehr harten, kompakten Festgesteinen wie Dolomit, Kalk und Anhydrit zuzuordnen sind. Es sind dies

- der Gansinger-Dolomit,
- die Anhydrite des unteren Gipskeuper,
- der Trigonodus-Dolomit,
- Platten- und Trochitenkalk, sowie
- die Anhydrite der Oberen Sulfatschichten der «Anhydritgruppe»

Alle diese Gesteine mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit für Longitudinalwellen um 4000 m/s und höher lassen ein weitgehend linear elastisches Material erwarten, in dem die Ausbildung von Scherwellen gewissermassen dämpfungsfrei vonstatten geht. Die Auswertung der in Tiefenabständen von 0,5 m fotografierten Gesamtschwingungszüge der beiden Akustik-Log-Empfänger bestätigt diese Aussage. Auf Beilage 11 sind ebenfalls die Bereiche mit eindeutig registrierten Schwerwelleneinsätzen eingezeichnet.

Die durch den Wirbelstromsender des Akustik-Logs erzeugte Ultraschallenergie unterliegt beim Durchlaufen des anstehenden Gebirges mehr oder minder starker Dämpfung auch für die Longitudinalwelle. Besonders starke Dämpfungseigenschaften bei Geschwindigkeitsrückgang bis 2200 m/s zeigt der Insektenmergel mit seinen siltigen Mergelschichten.

Wie aus der vergleichenden Darstellung von Gamma-Log, Gamma-Gamma-Log und Akustik-Log zum geologischen Profil ersichtlich (Beilage 11), zeigt das Gamma- und Gamma-Gamma-Log für den Opalinus-Ton mit zunehmender Tiefe eine gleichmässig stetige Zunahme von Radioaktivität und Dichte ohne besondere Dynamik im Messkurvenverlauf. Eine gewisse Dynamik hingegen ist im Akustik-Log mit Geschwindigkeitsschwankungen zwischen 2100 m/s und 2500 m/s zu erkennen. Besonders hinzuweisen ist auf das Geschwindigkeitsmaximum bei 31,5 m Tiefe, welches zeigt, dass die (seismische) Verwitterungszone des Opalinus-Tons in den Tiefenbereich oberhalb 29 m verlegt werden muss. Die relativ grossen Geschwindigkeitsschwankungen um einen Mittelwert von 2300 m/s im Tiefenbereich zwischen 55 m und 59 m bestätigen die in den Bohrkernen erkennbaren Klüfte.

8.3.8 Temperatur-Log

Wie im Kapitel 8.2 erwähnt, wurde nach Erreichen des Gansinger-Dolomits im unverrohrten Bohrloch ein Temperatur-Log gefahren, dessen Deutung wegen eines relativ grossen Temperaturgradienten ab etwa 82 m zunächst nicht möglich war. Nach Beendigung der Bohrarbeiten bei 131 m Tiefe wurde die Temperaturmessung nach einer Nachruhezeit von 7½ Stunden wiederholt. Diese zweite Log zeigte, dass der grosse Temperaturgradient auf einen Wasserzufluss bei 106,8 m aus dem Gansinger-Dolomit zurückzuführen ist, was durch das nachträglich gemessene Salinometer-Log noch zusätzlich bestätigt wird.

Unter der Annahme, dass das aus dem Gansinger-Dolomit ausfliessende Wasser bei der ersten Vermessung erst bis etwa 82 m u. T. aufgestiegen war (artesisch an der Erdoberfläche ist dieses Wasser nicht ausgeflossen), lässt sich aus beiden Logs der ersten Messetappe ein zusam-

menhängendes Temperatur-Log konstruieren (Beilage 13). Dieses zeigt zwischen 30 m und 130 m Tiefe einen langsam von 0,04 °C/m auf 0,07 °C/m zunehmenden Temperaturverlauf.

Da die Bohrung vor der zweiten Messetappe bis 203 m verrohrt werden musste, konnten zwischen 131 m und 203 m keine Temperaturmessungen vorgenommen werden.

Das Temperatur-Log der zweiten Messetappe (203–321,7 m) wurde gegen den Strom der artesisch ausfliessenden Muschelkalkwässer gefahren (Beilage 14). Dabei floss eine Mischwassermenge von ca. 33,3 l/min aus dem Bohrloch aus, mit einer Endtemperatur von ca. 23 °C an der Erdoberfläche.

Im wahrscheinlich ungestörten Bereich zwischen 314 m und der Endtiefe 321,8 m lässt sich bei einer Maximaltemperatur von 28,16 °C ein Temperaturgradient von 0,039 °C/m ableiten. Für den Bereich oberhalb 240 m und der Hilfsverrohrung bei 202,85 m ist das Temperatur-Log nur eine nützliche Interpretationshilfe bei der Deutung der Wasserzuflüsse aus dem Muschelkalk-Aquifer.

8.3.9 Wasserzuflussmessung (Flowmeter-Log)

Durch Temperatur- und Salinometer-Log waren tiefenmässig die Zuflüsse im Gansinger-Dolomit und Muschelkalk bereits festgelegt. Mit dem gegen den Strom des artesisch ausfliessenden Wassers gefahrenen Flowmeter konnten im Muschelkalk die ausfliessenden Einzelmengen bestimmt werden. Es ergaben sich folgende Werte:

Tiefenbereich	Zuflüsse
von 227,30 bis 231,60m	ca. 16,5 l/min.
von 286,70 bis 289,70m	ca. 5,0 l/min.
von 292,80 bis 294,20m	ca. 3,8 l/min.
von 300,30 bis 301,00m	ca. 7,7 l/min.

Wie die Beilagen 13 und 14 zeigen, lassen sich aus der Gegenüberstellung von Flowmeter-, Salinometer-, Temperatur- und Kaliber-Log die Wasserzutrittsorte im Bohrloch mit z. T. verblüffender Genauigkeit ermitteln.

Auffallend ist, dass der Wasserzufluss im Gansinger-Dolomit (Beilage 13) sich nicht durch eine Kaliberspitze bemerkbar macht. Der Dolomit selbst ist lediglich durch eine geringfügige Kaliberverengung gegenüber dem darüber und darunterliegenden «weicheren» Gestein erkennbar. Von den Zuflüssen aus dem Muschelkalk (Beilage 14) kommt der oberste um 230 m Tiefe aus einem ausgeweiteten Bohrlochabschnitt, charakterisiert durch stark porösen Dolomit mit offenen Klüften, Drusen und Hohlformen von Makrofossilien. Ähnliches gilt auch für den untersten Zufluss bei 300 m. Nur geringfügige Kaliberänderungen zeigen hingegen die Zuflüsse zwischen 286 m und 295 m. Die auffallende Kaliberverengung kurz vor Erreichen der Endtiefe bei 321 m im Anhydrit wurde durch eine Wiederholungsmessung überprüft. Sie ist durch das unter Wasseraufnahme bedingte Quellen des Anhydrits zu erklären.

9. Felsmechanische Untersuchungen

(H. G. Locher, Terrexpert AG, Bern
A. Thut, Solexperts AG, Schwerzenbach)

9.1 Allgemeines

An einer Reihe von Kernproben des Opalinus-Tons aus Tiefen von 33 m bis 63 m wurden durch die Terrexpert AG, Bern, felsmechanische Untersuchungen ausgeführt. Während der Bohrarbeiten führte die Solexperts AG, Schwerzenbach, mit einer Dilametersonde Deformationsmessungen im Bohrloch durch.

9.2 Art und Umfang der Untersuchungen

Im Labor der Terrexpert AG wurden folgende Felseigenschaften bestimmt:

- allgemeine Felskennwerte (Wassergehalt, Raumgewicht, spezifisches Gewicht)
- einaxiale Druckfestigkeit
- Scherfestigkeit im Triaxialversuch
- Scherfestigkeit im direkten Scherversuch
- Schrumpf- und Quellungsfähigkeit infolge von Temperaturänderungen, Zugabe von Wasser und Kochsalzlösung, Portlandzement und verschiedenen Laugen

Die Untersuchung umfasste über den Tiefenbereich 33 m bis 63 m 6 Proben. Aus den Messdaten wurden Mittelwerte, Variationskoeffizienten der Ergebnisse und Veränderungstendenzen berechnet. Wegen der kleinen Probenzahl sind diese Resultate allerdings statistisch nicht genügend gesichert.

Die Firma Solexperts AG führte während der Bohrarbeiten an 9 Messstellen im Opalinus-Ton zwischen 26,5 m und 65 m In-situ-Deformationsmessungen aus.

9.3 Allgemeine Felskennwerte und einaxiale Druckversuche

Bei Ankunft im Labor wiesen die Proben folgende durchschnittliche Felskennwerte auf:

	Mittelwert	Variationskoeffizient
Wassergehalt	6,9%	± 20%
Raumgewicht (feucht)	2,43 g/cm ³	± 1%
Spez. Gewicht	2,75 g/cm ³	± 1%
Druckfestigkeit (korr. auf d/h = 1)	55 kg/cm ²	± 25%
Verformungsmodul bei Erstbelastung	13'500 kg/m ²	± 35%

Beim Gestein der Proben handelt es sich um einen stark überkonsolidierten tonigen Silt mit Kalkbindung. Auf die Bestimmung der Atterberggrenzen und Kornverteilungskurven musste verzichtet werden, da es auch nach mehrmonatiger Wasserlagerung nicht gelang, das Gesteinsmaterial vollständig zu trennen und im Wasser zu suspendieren. Wassergehalt und Raumgewicht streuen über die Tiefe von 33 m bis 63 m regelmässig. Die Druckfestigkeit nimmt dagegen mit der Tiefe leicht zu.

9.4 Triaxiale Druckversuche

Beim triaxialen Druckversuch werden zylindrische Kernstücke in eine Gummimembrane eingeschlossen und einem allseitigen Druck sowie einem zusätzlichen Axialdruck ausgesetzt.

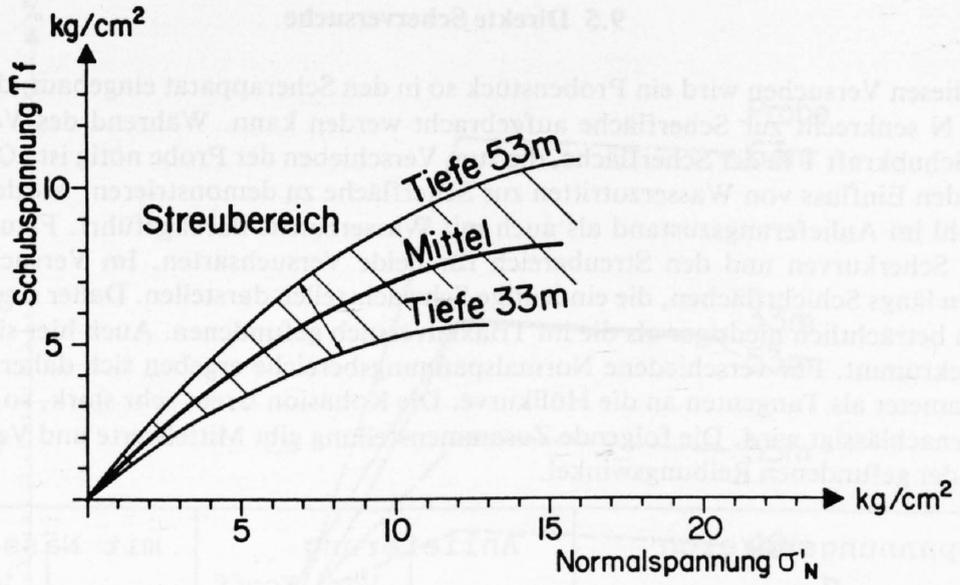
Die Versuche wurden als konsolidiert-undrainierte Versuche durchgeführt. Die gemessenen Porenwasserspannungen waren immer negativ. An jeder Probe wurden vier Versuche bei verschiedenen Seitendrücken ausgeführt, mit dazwischenliegenden Konsolidationsphasen (Multi-stage-Verfahren). In den Versuchen wurden die Scherfestigkeitseigenschaften an Bruchflächen gemessen, welche schräg zu den Schichtflächen verlaufen und daher alle stärker verkalkten Schichten durchschneiden.

Die mittlere Scherkurve und die Extremwerte sind in Figur 11 dargestellt. Die Umhüllenden der Mohrschen Kreise sind stark gekrümmt. Für verschiedene Bereiche der Normalspannung σ_N ergeben sich daher verschiedene Scherparameter als Tangenten an die Hüllkurve (Mittelwerte aller 6 Proben):

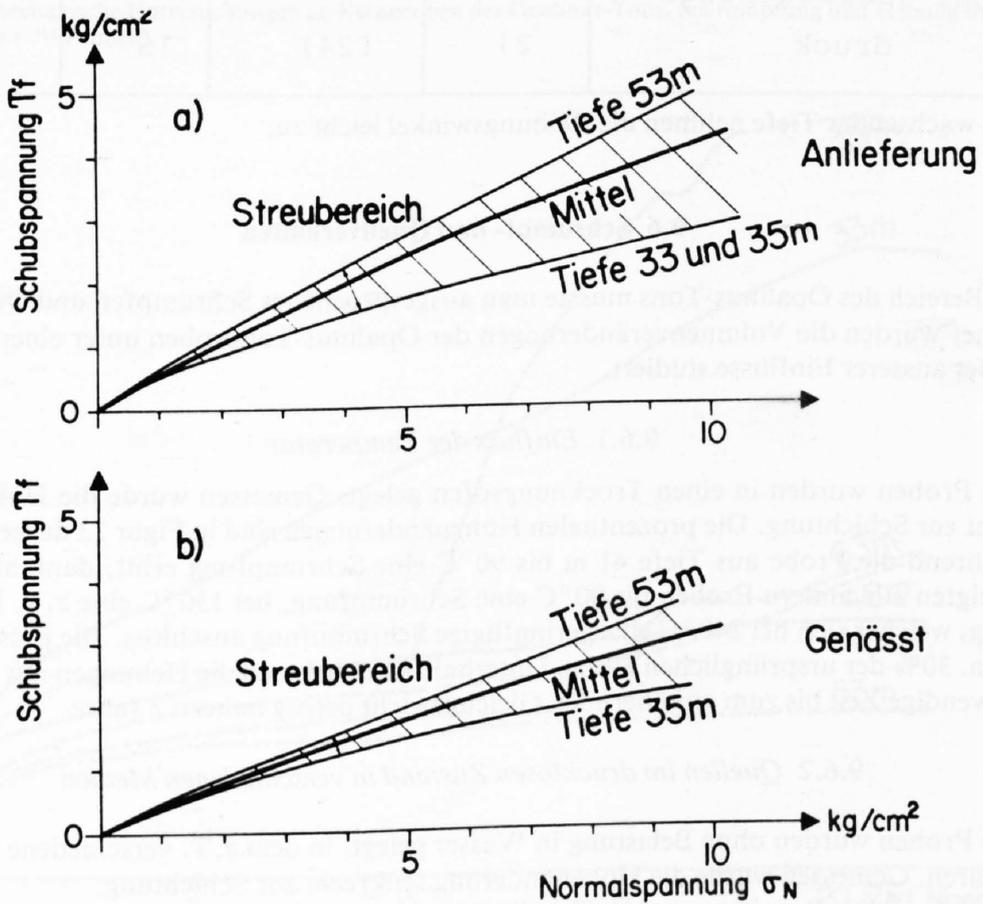
Spannungsbereich σ_N kg/cm ²	Kohäsion		Reibungswinkel	
	c' kg/cm ²	Var. Koeff. %	φ' °	Var. Koeff. %
2 - 4	0,4	(28%)	39	(13%)
4 - 8	1,2	(21%)	32	(15%)
bei Überlagerungs- druck	1.7	(40%)	31	(15%)

Alle Spannungen sind Effektivspannungen unter Berücksichtigung der gemessenen Porenwasserspannungen.

Mit wachsender Tiefe nehmen die Reibungswinkel eher ab, obwohl die Streuung gross und die Anzahl Versuche für die eindeutige Bestimmung einer Tendenz zu gering ist.



Figur 11: Triaxialversuche an Kernproben des Opalinus-Tons. Umhüllende der Mohr'schen Kreise. Mittelwert und Streubereich.



Figur 12: Scherversuche an Kernproben des Opalinus-Tons. Scherkurven der direkten Scherversuche.

9.5 Direkte Scherversuche

Bei diesen Versuchen wird ein Probenstück so in den Scherapparat eingebaut, dass eine Normalkraft N senkrecht zur Scherfläche aufgebracht werden kann. Während des Versuchs misst man die Schubkraft T in der Scherfläche, die zum Verschieben der Probe nötig ist.

Um den Einfluss von Wasserzutritten zur Scherfläche zu demonstrieren, wurden alle Versuche sowohl im Anlieferungszustand als auch mit Wasserzutritt durchgeführt. Figur 12 zeigt die mittleren Scherkurven und den Streubereich für beide Versuchsarten. Im Versuch erfolgt das Abscheren längs Schichtflächen, die eindeutige Schwachstellen darstellen. Daher sind die Scherfestigkeiten beträchtlich niedriger als die im Triaxialversuch gefundenen. Auch hier sind die Scherkurven gekrümmt. Für verschiedene Normalspannungsbereiche ergeben sich daher verschiedene Scherparameter als Tangenten an die Hüllkurve. Die Kohäsion streut sehr stark, so dass sie wohl besser vernachlässigt wird. Die folgende Zusammenstellung gibt Mittelwerte und Variationskoeffizienten der gefundenen Reibungswinkel.

Spannungsbereich σ_N kg/cm ²	Anlieferung		mit Nässung	
	φ_0	Var. Koeff. %	φ_0	Var. Koeff. %
2 - 4	24	(22)	19	(13)
4 - 8	22	(28)	16	(25)
bei Überlagerungs- druck	21	(24)	15	(25)

Mit wachsender Tiefe nehmen die Reibungswinkel leicht zu.

9.6 Schrumpf- und Quellverhalten

Im Bereich des Opalinus-Tons musste man ausgesprochenes Schrumpfen und Quellen erwarten. Daher wurden die Volumenveränderungen der Opalinus-Tonproben unter einer Anzahl verschiedener äusserer Einflüsse studiert.

9.6.1 Einfluss der Temperatur

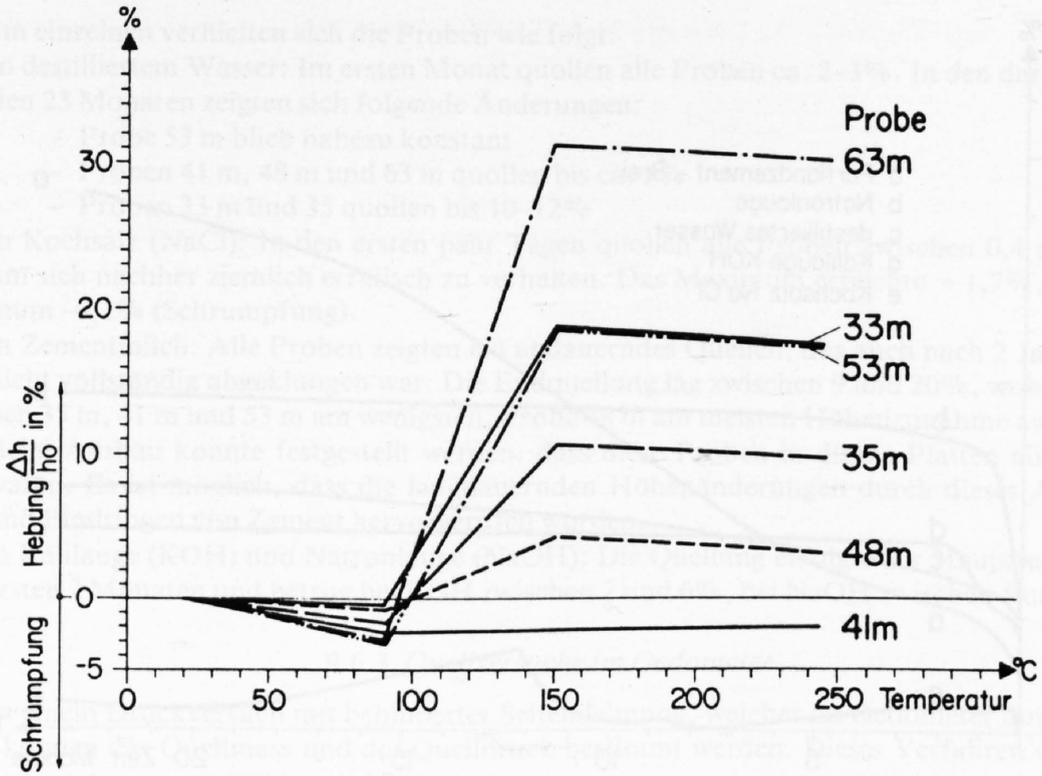
Die Proben wurden in einen Trocknungsofen gelegt. Gemessen wurde die Höhenänderung senkrecht zur Schichtung. Die prozentualen Höhenänderungen sind in Figur 13 dargestellt.

Während die Probe aus Tiefe 41 m bis 90°C eine Schrumpfung erlitt, dann aber konstant blieb, zeigten alle andern Proben bis 90°C eine Schrumpfung, bei 150°C eine z. T. beträchtliche Quellung, welcher sich bei 240°C eine geringfügige Schrumpfung anschloss. Die grösste Quellung betrug ca. 30% der ursprünglichen Höhe. Unterhalb 41 m nehmen die Hebungen mit der Tiefe zu. Die notwendige Zeit bis zum annähernden Gleichgewicht betrug nahezu 2 Jahre.

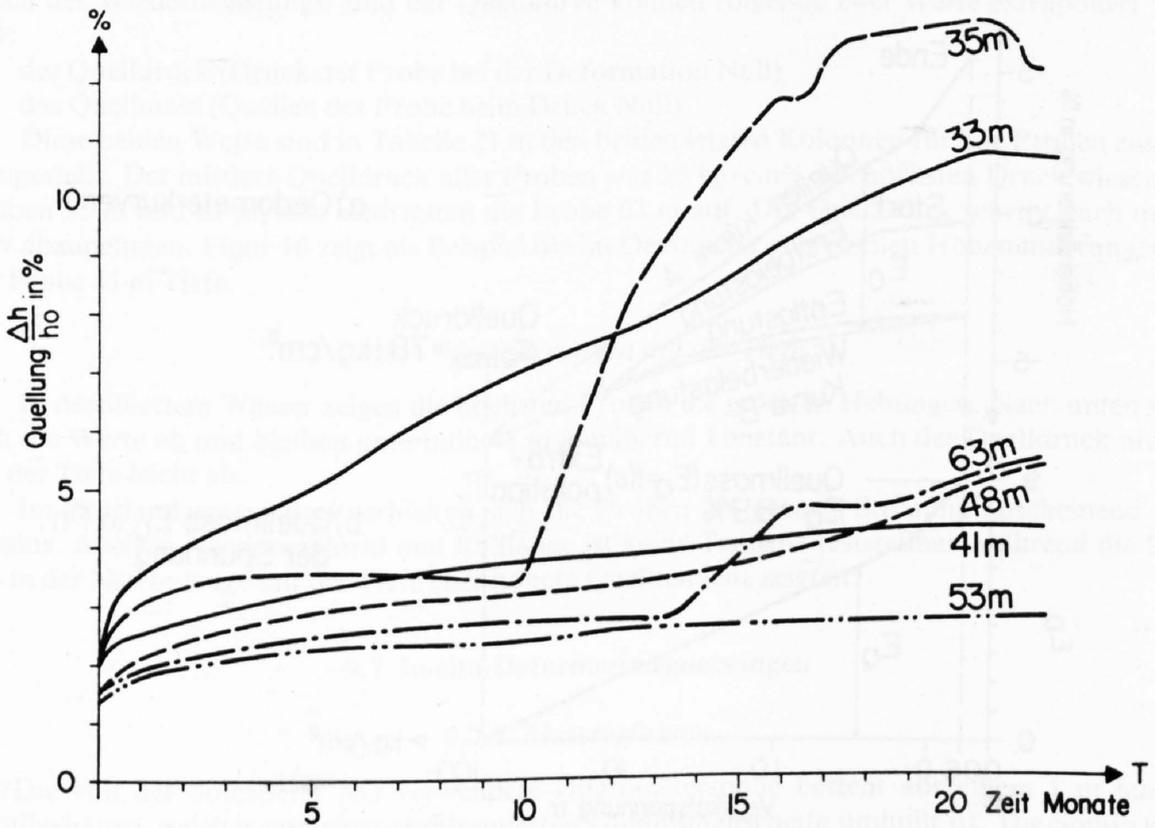
9.6.2 Quellen im drucklosen Zustand in verschiedenen Medien

Die Proben wurden ohne Belastung in Wasser gelegt, in dem z. T. verschiedene Chemikalien gelöst waren. Gemessen wurde die Höhenänderung senkrecht zur Schichtung.

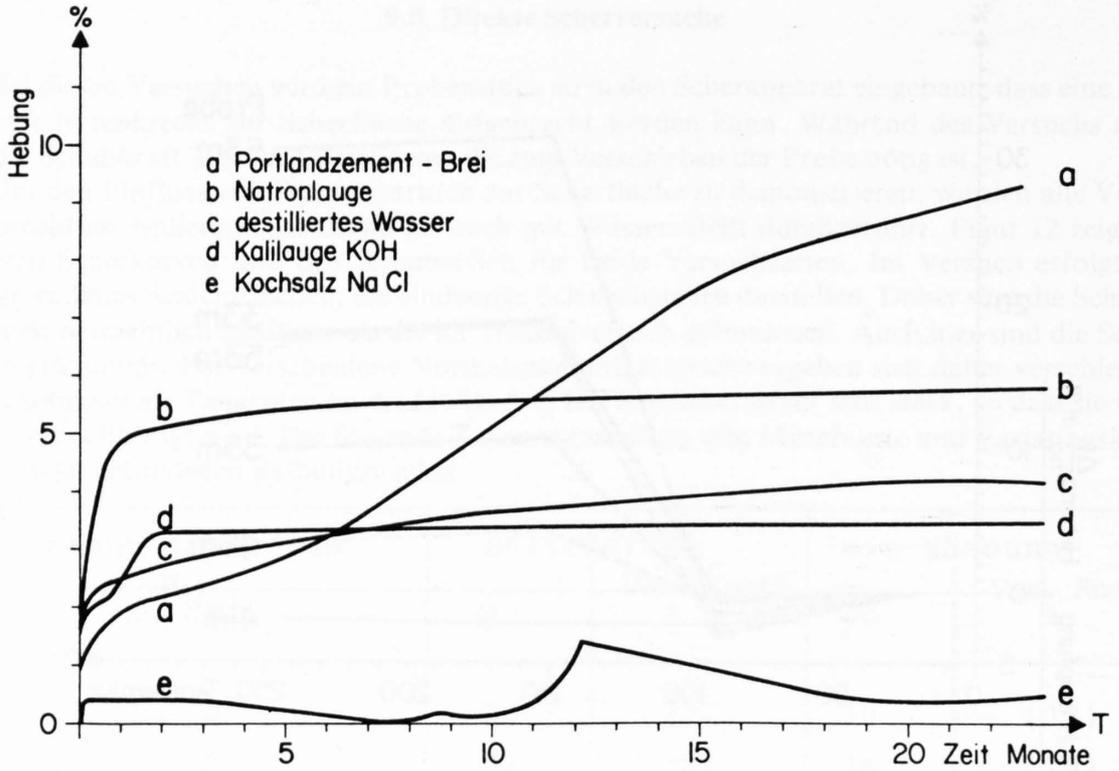
Die erhaltenen Resultate sind in Tabelle 21 zusammengestellt. Figur 14 zeigt die Quellung aller Proben in destilliertem Wasser, während Figur 15 das Verhalten einer Probe (Tiefe 41 m) unter den andern Chemikalien illustriert.



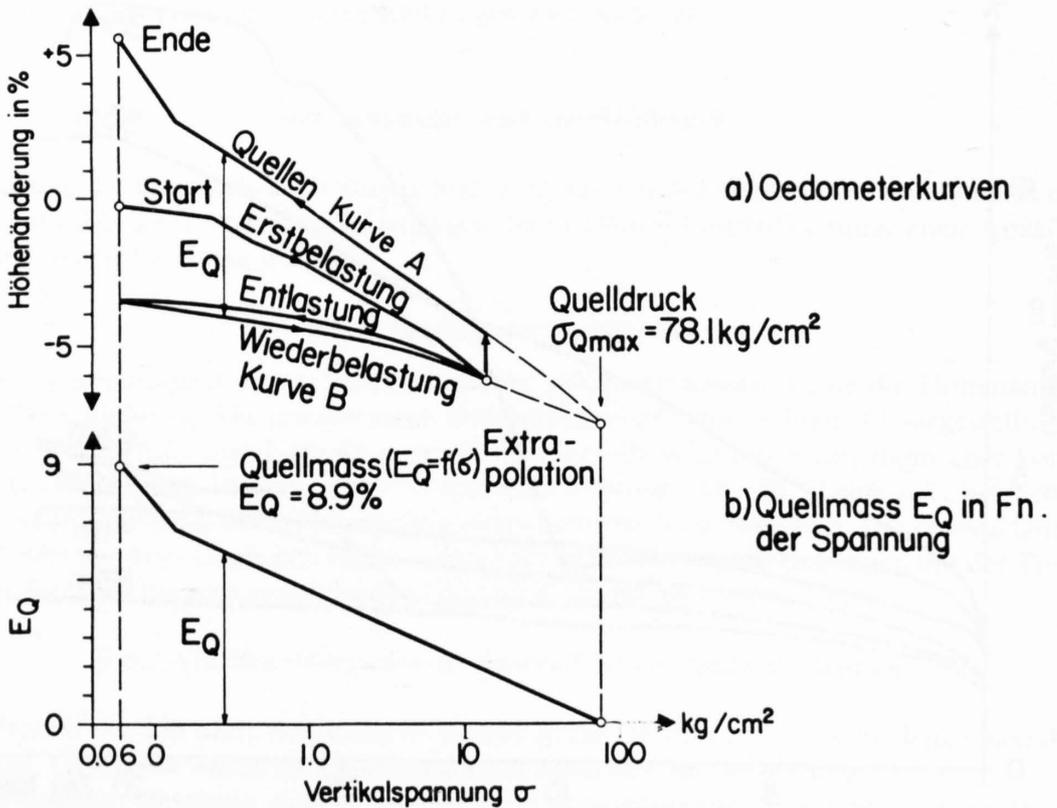
Figur 13: Felsmechanische Untersuchungen an Kernproben des Opalinus-Tons. Schrumpfung und Hebung in Funktion der Temperatur (alle Proben).



Figur 14: Felsmechanische Untersuchungen an Kernproben des Opalinus-Tons. Drucklose Quellung in destilliertem Wasser.



Figur 15: Felsmechanische Untersuchungen an Kernproben des Opalinus-Tons. Drucklose Quellung der Probe 41 m in verschiedenen Medien.



Figur 16: Felsmechanische Untersuchungen an Kernproben des Opalinus-Tons. Quellversuch im Oedometer. Probe 41 m.

Im einzelnen verhielten sich die Proben wie folgt:

- in destilliertem Wasser: Im ersten Monat quollen alle Proben ca. 2–3%. In den darauffolgenden 23 Monaten zeigten sich folgende Änderungen:
 - Probe 53 m blieb nahezu konstant
 - Proben 41 m, 48 m und 63 m quollen bis ca. 5%
 - Proben 33 m und 35 quollen bis 10–12%
- in Kochsalz (NaCl): In den ersten paar Tagen quollen alle Proben zwischen 0,4 und 0,9%, um sich nachher ziemlich erratisch zu verhalten. Das Maximum erreichte +1,7%, das Minimum -0,1% (Schrumpfung).
- in Zementmilch: Alle Proben zeigten ein andauerndes Quellen, das auch nach 2 Jahren noch nicht vollständig abgeklungen war. Die Endquellung lag zwischen 9 und 20%, wobei die Proben 35 m, 41 m und 53 m am wenigsten, Probe 48 m am meisten Höhenzunahme aufwiesen. Beim Ausbau konnte festgestellt werden, dass diese Proben in dünne Platten aufgespalten waren. Es ist möglich, dass die langdauernden Höhenänderungen durch dieses Aufspalten und Eindringen von Zement hervorgerufen wurden.
- in Kalilauge (KOH) und Natronlauge (NaOH): Die Quellung erfolgte zur Hauptsache in den ersten 2 Monaten und betrug bei KOH zwischen 2 und 6%, bei NaOH zwischen 5 und 11%.

9.6.3 Quellversuche im Oedometer

In einem Druckversuch mit behinderter Seitendehnung, welcher im Oedometer durchgeführt wird, können das Quellmass und der Quelldruck bestimmt werden. Dieses Verfahren wurde von HUDER und AMBERG (1970) beschrieben.

Die Probe wird in einen Oedometerring eingebaut und ohne Wasserzugabe stufenweise zuerst auf die Maximallast belastet, dann entlastet und wiederbelastet. Nachher wird die Probe unter Wasser gesetzt und bei einer stufenweisen Entlastung das Quellen registriert. Aus dem Vergleich der Wiederbelastungs- und der Quellkurve können folgende zwei Werte extrapoliert werden:

- der Quelldruck (Druck der Probe bei der Deformation Null)
- das Quellmass (Quellen der Probe beim Druck Null)

Diese beiden Werte sind in Tabelle 21 in den beiden letzten Kolonnen für alle Proben zusammengestellt. Der mittlere Quelldruck aller Proben war 55 kg/cm^2 ; den höchsten Druck wiesen die Proben 53 m und 41 m, den niedrigsten die Probe 63 m auf. Der Quelldruck scheint nach unten eher abzunehmen. Figur 16 zeigt als Beispiel die im Oedometer gemessenen Höhenänderungen an der Probe 41 m Tiefe.

9.6.4 Veränderungen mit der Tiefe

In destilliertem Wasser zeigen die höchsten Proben die grössten Hebungen. Nach unten nehmen die Werte ab und bleiben unterhalb 48 m annähernd konstant. Auch der Quelldruck nimmt mit der Tiefe leicht ab.

Im Portlandzement-Brei verhielten sich die Proben bei grosser Streuung anscheinend tendenzlos. Auch in Natriumchlorid und Kalilauge ist keine Tendenz feststellbar, während die Proben in der Natronlauge mit der Tiefe eher höhere Quell tendenz zeigten.

9.7 In-situ-Deformationsmessungen

9.7.1 Messverfahren

Die von der Solexperts AG verwendete Dilatometersonde besteht aus einem 1 m langen Metallgehäuse, welches von einer stahlarmierten Gummimanschette umhüllt ist. Die Sonde wird an einem Koaxialkabel ins Bohrloch abgesenkt. Auf der gewünschten Tiefe wird die Gummimanschette mit Hilfe von Stickstoff unter einem bestimmten Druck an die Bohrlochwand gepresst und

Tabelle 21: Quellverhalten von Opalinus-Tonproben im drucklosen Zustand in verschiedenen Medien

Probe Tiefe m	Quellhebung im drucklosen Zustand (Endwert) in % der Anfangshöhe h_0						Quelldruck im Oedometer mit destil- liertem Wasser	
	dest. Wasser %	NaCl %	Portland- zement %	KOH %	NaOH %	Quelldruck $\sigma_{Q_{max}}$ (bei $\epsilon_Q \approx 0\%$) kg/cm ²	Quellmass ϵ_{Q_0} (bei $\sigma_Q \approx 0$ kg/cm ²) %	
33	10,5	0,29	15,4	5,9	10,6	75,4	9,0	
35	13,0	0,53	10,7	3,3	6,6	48,4	5,5	
41	4,3	0,30	9,2	3,4	5,8	78,1	8,9	
48	5,2	1,03	19,8	2,3	9,9	52,5	5,0	
53	2,7	0,28	9,8	5,0	9,9	48,9	4,9	
63	5,3	1,17	14,0	3,9	11,3	28,4	5,7	
Mittel	6,8	0,60	13,1	4,0	9,0	55,3	6,5	
Standardabweichung	4,0	0,40	4,1	1,3	2,2	18,7	1,9	
% Variationskoeffizient	58	67	30	32	25	34	30	

mit Potentiometern die Deformation gemessen. Der Druck wird stufenweise verändert, unter Befolgung des in Figur 17 dargestellten Belastungs- und Entlastungsschemas.

9.7.2 Auswertung und Ergebnisse

Aus den Druck- und Deformationsmessungen können die Deformationsmoduli gerechnet werden, wobei die Formel von Lamé für unendlich dicke Rohre verwendet wird.

$$E = \frac{\Delta p}{\Delta d} \times d \times (1 + \nu)$$

Δp = Druckdifferenz

Δd = Änderung des Bohrlochdurchmessers

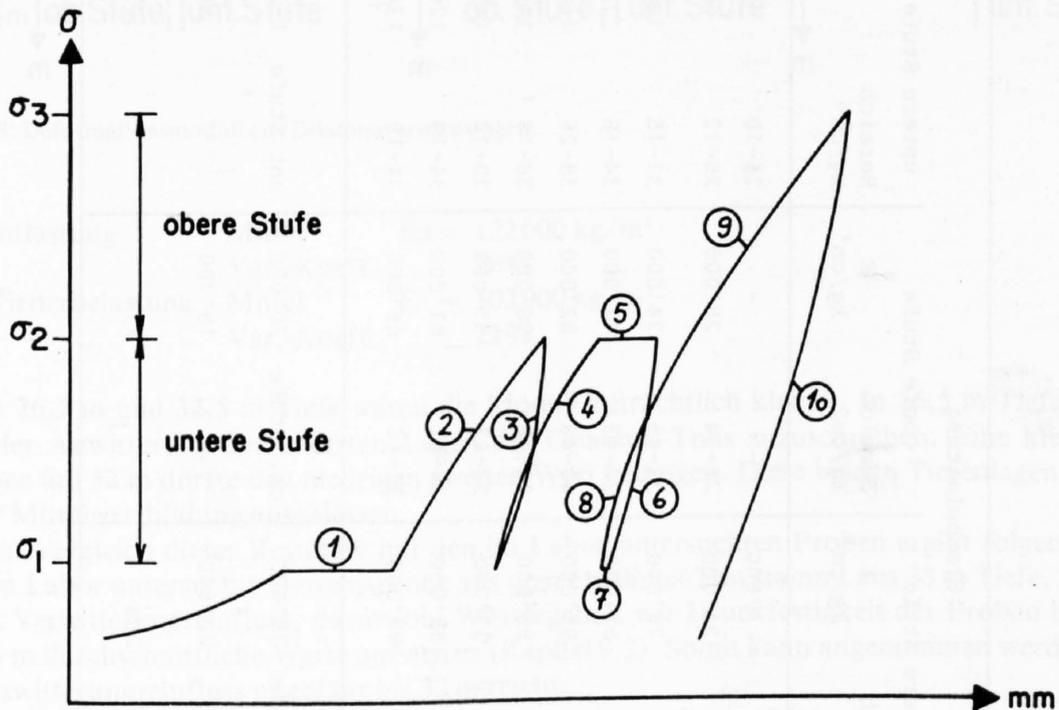
d = Bohrlochdurchmesser

ν = Poissonzahl (Annahme = 0,33)

So gerechnete Mittelwerte aus allen 3 Potentiometerablesungen sind in Tabelle 22 zusammengestellt und in Figur 18 aufgezeichnet.

Ab Tiefe 38 m sind die Messungen ziemlich einheitlich und geben folgende Durchschnittswerte (über alle Laststufen):

Erstbelastung	Mittel	$\bar{E} = 73\,000 \text{ kg/m}^2$
	Var.-Koeff.	28%

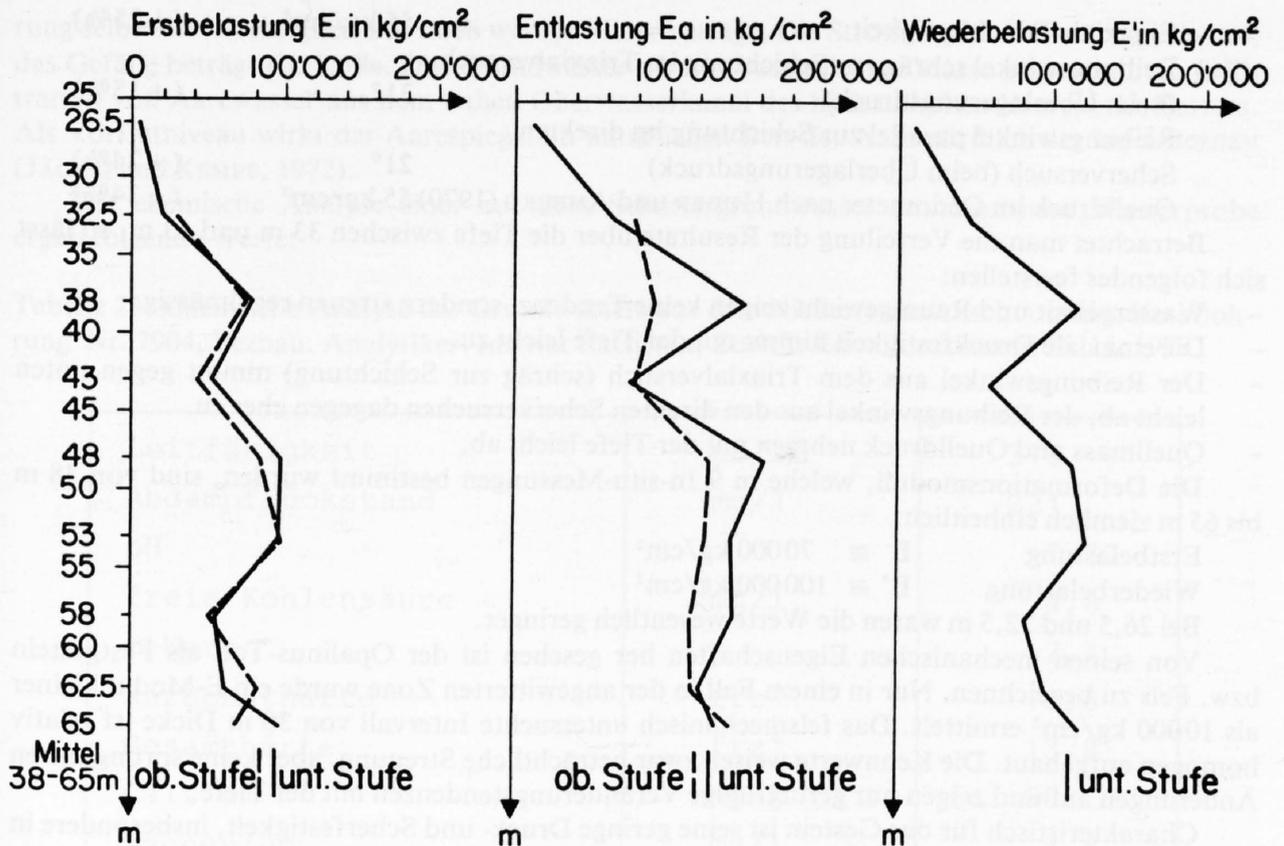


Figur 17: Dilatometermessungen, Belastungs- und Entlastungsschema

- 1 Wartezeit von 20 Minuten bei $\sigma_1 = \text{konstant}$ (δ_1 entspricht ca. dem Überlagerungsdruck)
- 2 Erstbelastung bei σ_2 im unteren Spannungsbereich
- 3 1. Entlastung von σ_2 bis σ_1 (ohne Wartezeit bei σ_2)
- 4 1. Wiederbelastung von σ_1 bis σ_2 (ohne Wartezeit bei σ_1)
- 5 Wartezeit von 20 Minuten bei $\sigma_2 = \text{konstant}$
- 6 2. Entlastung von σ_2 bis σ_1
- 7 Wartezeit von 20 Minuten bei $\sigma_1 = \text{konstant}$
- 8 2. Wiederbelastung von σ_1 bis σ_2
- 9 Erstbelastung im oberen Spannungsbereich von σ_2 bis σ_3
- 10 3. Entlastung von σ_3 bis $\sim \sigma_1$

Tabelle 22: In-situ-Deformationsmessungen, Zusammenstellung der Deformationsmoduli

Tiefe m	Erstbelastung				Entlastung				Wiederbelastung	
	untere Stufe Bereich kg/cm ²	untere Stufe E kg/cm ²	obere Stufe Bereich kg/cm ²	obere Stufe E kg/cm ²	untere Stufe Bereich kg/cm ²	untere Stufe Ea kg/cm ²	obere Stufe Bereich kg/cm ²	obere Stufe Ea kg/cm ²	untere Stufe Bereich kg/cm ²	untere Stufe E' kg/cm ²
26,5	18-24	4'600	-	-	26-10	13'200	-	-	10-26	11'400
32,5	20-26	21'000	28-34	28'000	26-12	65'000	40-24	78'000	12-26	48'000
38,0	19-31	76'000	33-45	74'000	31-15	149'000	53-29	91'000	15-31	116'000
43,0	18-24	51'000	36-42	42'000	34-18	76'000	54-30	78'000	18-34	61'000
48,0	26-28	95'000	40-48	82'000	38-26	163'000	54-38	127'000	26-38	113'000
53,0	30-38	95'000	40-48	96'000	38-18	140'000	54-34	124'000	18-38	122'000
58,0	18-24	53'000	32-42	51'000	30-18	143'000	52-20	114'000	18-30	85'000
62,5	18-26	59'000	36-42	81'000	34-18	120'000	52-32	117'000	18-34	96'000
65,0	18-26	97'000	38-44	66'000	34-18	134'000	52-32	140'000	18-34	119'000
Tiefe 38-65m Mittel kg/cm ²	unt. Stufe	75'000	ob. Stufe	70'000	unt. Stufe	132'000	ob. Stufe	113'000	unt. Stufe	102'000
Standardabweichung kg/cm ²		20'800		18'700		28'100		21'500		22'500
% Variationskoeffizient		28%		27%		21%		19%		22%



Figur 18: Deformationsmoduli aus Dilatometermessungen.

Entlastung	Mittel	$\bar{E}_a = 122000 \text{ kg/m}^2$
	Var.-Koeff.	20%
Wiederbelastung	Mittel	$\bar{E}' = 102000 \text{ kg/m}^2$
	Var.-Koeff.	22%

In 26,5 m und 32,5 m Tiefe waren die Moduli beträchtlich kleiner. In 26,5 m Tiefe ist dies wohl der Anwitterung der obersten Lagen des Opalinus-Tons zuzuschreiben. Eine kluffreiche Störzone um 32 m dürfte den niedrigen zweiten Wert bedingen. Diese beiden Tiefenlagen wurden bei der Mittelwertbildung ausgelassen.

Ein Vergleich dieser Resultate mit den im Labor untersuchten Proben ergibt folgendes: die erste im Labor untersuchte Gesteinsprobe aus dem Opalinus-Ton stammt aus 33 m Tiefe. Sie zeigt keinen Verwitterungseinfluss, da sowohl Wassergehalt wie Druckfestigkeit der Proben bei 33 m und 35 m durchschnittliche Werte aufweisen (Kapitel 9.3). Somit kann angenommen werden, dass der Verwitterungseinfluss ungefähr bis 32 m reicht.

9.8 Felsmechanische Charakterisierung des Opalinus-Tons

Der in der Bohrung durchbohrte Teil des Opalinus-Tons kann als stark überkonsolidierter, toniger Silt mit ziemlich starker Kalkbindung charakterisiert werden.

Im Mittel aus sechs Proben ergaben sich folgende Hauptresultate der felsmechanischen Untersuchung (Mittelwerte und Variationskoeffizienten):

- Wassergehalt	6,9%	(± 20%)
- Feuchtraumgewicht	2,43 g/cm ³	(± 1%)

- Einaxiale Druckfestigkeit	55 kg/cm ²	(± 25%)
- Reibungswinkel schräg zur Schichtung im Triaxialversuch (beim Überlagerungsdruck)	31°	(± 15%)
- Reibungswinkel parallel zur Schichtung im direkten Scherversuch (beim Überlagerungsdruck)	21°	(± 24%)
- Quelldruck im Oedometer nach HUDER und AMBERG (1970)	55 kg/cm ²	(± 34%)

Betrachtet man die Verteilung der Resultate über die Tiefe zwischen 33 m und 63 m, so lässt sich folgendes feststellen:

- Wassergehalt und Raumbgewicht zeigen keine Tendenz, sondern streuen regelmässig.
- Die einaxiale Druckfestigkeit nimmt mit der Tiefe leicht zu.
- Der Reibungswinkel aus dem Triaxialversuch (schräg zur Schichtung) nimmt gegen unten leicht ab, der Reibungswinkel aus den direkten Scherversuchen dagegen eher zu.
- Quellmass und Quelldruck nehmen mit der Tiefe leicht ab.

Die Deformationsmoduli, welche in 9 In-situ-Messungen bestimmt wurden, sind von 38 m bis 65 m ziemlich einheitlich:

Erstbelastung $E \cong 70000 \text{ kg/cm}^2$

Wiederbelastung $E' \cong 100000 \text{ kg/cm}^2$

Bei 26,5 und 32,5 m waren die Werte wesentlich geringer.

Von seinen mechanischen Eigenschaften her gesehen ist der Opalinus-Ton als Festgestein bzw. Fels zu bezeichnen. Nur in einem Fall in der angewitterten Zone wurde ein E-Modul kleiner als 10000 kg/cm² ermittelt. Das felsmechanisch untersuchte Intervall von 30 m Dicke ist relativ homogen aufgebaut. Die Kennwerte weisen zwar beträchtliche Streuung, aber keine sprunghaften Änderungen auf und zeigen nur geringfügige Veränderungstendenzen mit der Tiefe.

Charakteristisch für das Gestein ist seine geringe Druck- und Scherfestigkeit, insbesondere in Richtung der Schichtung und die ausgesprochene Tendenz zum Quellen.

10. Hydrogeologische Verhältnisse

(H. Jäckli und A. Rissi, Zürich)

10.1 Quartäre Schichten

10.1.1 Niederterrassenschotter

Der sandig-siltige Kies des Niederterrassenschotters, der in der Kernbohrung bis auf 8,4 m Tiefe durchfahren wurde, stellt einen Grundwasserleiter dar, wie er für die Talsohlen des schweizerischen Mittellandes typisch ist. Aus den Ergebnissen verschiedener Versuche in der näheren Umgebung kann auf einen Durchlässigkeitskoeffizienten von rund $k = 2 - 5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ geschlossen werden.

In der Bohrung wurde der ungespannte Grundwasserspiegel am 15. November 1979 auf 5,03 m u. T. = Kote 320,77 m ü. M. angetroffen. Langjährige Grundwasserbeobachtungen legen an dieser Stelle den Tiefstand auf Kote 319,60 m ü. M. und den Hochwasserstand auf Kote 321,40 m ü. M. Die jahreszeitlich bedingten Spiegelschwankungen verlaufen weitgehend konform zu den Schwankungen in der Aare mit deutlicher Dämpfung der kurzfristigen Spitzen, aber in der Regel mit einem breiten Maximum in den Sommermonaten und einem ebenso breiten Minimum während der winterlichen Niederwasserstände.

Die Bohrung Nr. 7904, Beznau, liegt nahe dem Westrand des nutzbaren Grundwasserstroms des Aaretals, der gegen Osten, gegen die Talmitte, an Mächtigkeit zunimmt, während in der Boh-

rung selbst die Mächtigkeit nur noch wenige Meter beträgt. Die Strömung ist nordwärts gerichtet, das Gefälle beträgt ca. 1,5‰. Das Grundwasser wird in wesentlicher Masse gespeist durch Infiltration von Aarewasser aus dem nahen Oberwasserkanal des hydraulischen Kraftwerks Beznau. Als Vorflutniveau wirkt der Aarespiegel im natürlichen Bett der Aare nördlich der Insel Beznau (JÄCKLI und KEMPF, 1972).

Die chemische Analyse einer aus dem Schottergrundwasser entnommenen Wasserprobe ergab folgende Werte:

Tabelle 23: Chemische Analyse des Grundwassers aus dem Niederterrassenschotter der Kernbohrung Nr. 7904, Beznau. Analytiker: Institut Bachema, Zürich. Entnahmedatum: 19. 11. 1979

Leitfähigkeit	µS/cm	316
Abdampfrückstand	mg/l	221
pH		7,35
freie Kohlensäure	mg/l	4,8
m-Wert		+2,4
Karbonathärte	frz°	12,0
Gesamthärte	frz°	13,8
Calcium	mg/l	50
Magnesium	mg/l	3,4
Eisen	mg/l	0,1
Mangan	mg/l	0,05
Sulfate	mg/l	43
Ammonium	mg/l	0,54
Nitrite	mg/l	1,35
Nitrate	mg/l	1,6
Phosphate	mg/l	0,13
Chloride	mg/l	8,5
Oxidierbarkeit (KMnO ₄)	mg/l	16

In chemischer Beziehung zeigt das Grundwasser alle Anzeichen der Infiltrationswirkung von weichem, aber organisch belastetem Aarewasser: relativ geringe Karbonat- und Gesamthärte, dazu sehr geringer Nitratgehalt, aber relativ hoher Nitritgehalt, beides durch chemische Reduktion bedingt. Es handelt sich hier um ein deutlich reduziertes Grundwasser als Folge der Flusswasserinfiltration und der dadurch verursachten Sauerstoffzehrung.

10.1.2 Verschwemmtes Moränenmaterial

Unter dem Niederterrassenschotter grosser Durchlässigkeit folgt mit einer Mächtigkeit von 11,9 m eine lehmreiche, siltig-sandige Kiesschicht mit Blöcken. Sie ist relativ kompakt gelagert und wird als verschwemmtes Moränenmaterial aus der Risseiszeit gedeutet. Die Durchlässigkeit

dürfte aufgrund der Kornverteilung grössenordnungsmässig $k = 10^{-4}$ bis 10^{-5} m/s betragen, wurde aber in der Bohrung nicht experimentell bestimmt. Wegen dieser geringen Durchlässigkeit unter den bedeutend durchlässigeren Kiesen des Niederterrassenschotter wird das verschwemmte Moränenmaterial bereits als Grundwasserstauer eingestuft und das in ihm zirkulierende Porenwasser als nicht nutzbar betrachtet.

Da in den quartären Schichten die Bohrung verrohrt und die Verrohrung im darunter folgenden Opalinus-Ton zementiert wurde, besteht keine Verbindung zwischen diesem oberflächlichen Grundwasser in den Lockergesteinen und dem in tieferen Horizonten angetroffenen Felsgrundwasser.

Tabelle 24: Abpressversuch mit Doppelpacker im unverrohrten Bohrlochabschnitt

Teststrecke	Geologische Schicht	Durchlässigkeitswert in Lugeon
203,00-206,00	Gipskeuper	0,7
205,70-211,00		1,0
210,70-216,00		0,4
215,70-221,00	Lettenkohle	0,9
220,70-226,00	Trigonodus-Dolomit	2,8
225,70-231,00		7,0
230,70-236,00		5,7
235,70-241,00		1,1
240,70-246,00		0,5
235,70-251,00		0,5
250,70-256,00	Trigonodus-Dol./Plattenkalk	0,5
255,70-261,00	Plattenkalk	0,3
260,70-266,00		0,3
265,70-271,00		0,3
270,70-276,00	Plattenkalk-Trochitenkalk	0,5
275,70-281,00	Trochitenkalk	0,3
280,70-286,00		0,3
285,70-291,00		4,1
290,70-296,00		7,4
295,70-301,00	Dolomit der "Anhydritgruppe"	6,6
300,70-306,00		6,2
305,70-311,00	Obere Sulfatschichten der	0,0
310,70-316,00	"Anhydritgruppe"	0,0
315,70-321,00		0,0

10.2 Durchlässigkeitsverhältnisse

Zur experimentellen Bestimmung der Durchlässigkeiten nach Lugeon wurde durch die Swiss-boring AG die gesamte unverrohrte Bohrlochstrecke mittels Doppelpacker abgepresst, und zwar

- während des Bohrvortriebes von 24,80 bis 131,15 m (Opalinus-Ton bis Basis Schilfsandstein) von oben nach unten und
- nach Abschluss der Bohrung im unverrohrten Bohrlochteil von unten nach oben bis zum Rohrschuh auf 203,00 m (Endtiefe bis unterster Gipskeuper).

Der Versuchsablauf war folgender:

- Vorerst wurden vor Einsetzen bzw. Anpressen des Doppelpackers der artesische Ausfluss aus dem freien Standrohr und der artesische Überdruck gemessen.
- Danach wurden die Packer oberhalb und unterhalb der Teststrecke angepresst und der artesische Ausfluss aus dem Standrohr oberhalb der Teststrecke sowie aus der Teststrecke selbst gemessen, ebenso der artesische Überdruck innerhalb der Teststrecke.
- Dann wurde die Druckpumpe an die Steigleitung des Abpresskolbens angeschlossen und wurden die eingepresste Wassermenge innerhalb der Teststrecke sowie der Ausfluss aus dem Standrohr oberhalb der Teststrecke bei verschiedenen Druckstufen von 0 bis 10 bar gemessen.

Bei den 16 Abpressversuchen im Abschnitt 24,80–131,15 m erwiesen sich sämtliche Schichten mit Ausnahme des Gansinger-Dolomits als praktisch undurchlässig. Der Abpressversuch im Gansinger-Dolomit ergab einen Durchlässigkeitswert von 4,0 Lugeon.

Aus Tabelle 24 und Beilage 1 sind die Ergebnisse der 24 Abpressversuche im Abschnitt 203,00–321,00 m ersichtlich. Die grössten Durchlässigkeitswerte wurden dabei im oberen Teil des Trigonodus-Dolomits sowie im untersten Trochitenkalk ermittelt. Relativ hohe Durchlässigkeiten wurden auch im Dolomit der «Anhydritgruppe» festgestellt. Dagegen trat im durchbohrten Teil der Oberen Sulfatschichten kein Wasser ins Bohrloch zu.

10.3 Opalinus-Ton

Der Opalinus-Ton, dessen unterer Teil in einer Mächtigkeit von 45,40 m durchfahren wurde, führte in der Kernbohrung Nr. 7904 kein Wasser. Hingegen gelang es, aus den beiden benachbarten untiefen Bohrungen Nr. 7901 und Nr. 7902 Wasserproben für chemische Analysen zu entnehmen.

10.4 Lias

Der Lias in einer Mächtigkeit von 32,70 m (ohne untersten Opalinus-Ton) besteht aus einer Wechsellagerung geringmächtiger Kalkbänke zwischen mächtigen Tonschichten (Beilage 3). In keinen dieser Schichten, weder in den Mergeln noch in den Kalken, wurde beim Bohrvortrieb Wasser angetroffen.

10.5 Keuper

10.5.1 Wasserführung

Die 118,90 m mächtigen, vorwiegend mergeligen Schichten des Keuper erwiesen sich mit Ausnahme des Gansinger-Dolomits als undurchlässig. In der etwas geklüfteten, 4,15 m mächtigen Dolomitschicht des Gansinger-Dolomits gelang es, während eines Kleinpumpversuchs ca. 31/min Wasser zu schöpfen, dessen chemische Analyse auf Tabelle 26 gegeben ist. Die Wassertemperatur gemäss Temperatur-Log beträgt im Gansinger-Dolomit ca. 17,6°C.

Tabelle 25: Chemische Analysen des Porenwassers aus dem Opalinus-Ton

Analytiker: Institut Bachema, Zürich

Entnahmedatum: 2. 11. 1979

		Nr. 7901	Bohrung Beznau	Nr. 7902
Temperatur Wasser	°C	13		13
Leitfähigkeit	µS/cm	7923		4049
Abdampfrückstand	mg/l	4912		3160
pH		12,10		8,05
freie CO ₂	mg/l	0		3,50
p-Wert	mval/l	+16,95		-
m-Wert	mval/l	+17,90		+3,10
Gesamthärte	°frz.	73,00		15,20
Ca	mg/l	292		38
Mg	mg/l	0,10		14
Fe	mg/l	0,05		0,22
Mn	mg/l	0,05		0,10
SO ₄	mg/l	1960		1530
NH ₄	mg/l	8,80		5,20
NO ₂	mg/l	0,10		0,08
NO ₃	mg/l	0,40		0,10
PO ₄	mg/l	0,06		0,09
Cl	mg/l	790		538
KMnO ₄ -Verbrauch	mg/l	41		11

10.5.2 Druckverhältnisse

Das Druckniveau im Gansinger-Dolomit lag am 14. 1. 1980 auf -4,79 m u. T. und zeigte an jenem Tage gegenüber dem Schotter-Grundwasser einen Überdruck von 1,19 m. Es kann also als leicht subartesisch gespannt bezeichnet werden.

10.5.3 Chemismus

Beim Wasser aus dem Gansinger-Dolomit handelt es sich gemäss Tabelle 26 um ein hochmineralisiertes Natrium-Calcium-Magnesium-Sulfat-Chlorid-Wasser mit Lithium, Fluor, Eisen und Brom, mit einer Gesamtkonzentration als Summe der gelösten festen Bestandteile von 14683 mg/l.

10.6 Oberer Muschelkalk

10.6.1 Wasserführung

Der obere Muschelkalk erreicht in der Bohrung eine Mächtigkeit von 79,05 m. Die obersten 4 m davon (Lettenkohle, Kapitel 3.2.13), bestehend aus mergeligen Dolomiten mit etwas Ton, sind von geringer Durchlässigkeit. Darunter folgen Trigonodus-Dolomit, Plattenkalk und Trochitenkalk, die als kompetente und dadurch geklüftete Karbonatschichten eine oft nennenswerte Durchlässigkeit aufweisen (Tabelle 24).

Tabelle 26: Chemische Analysen von Wasser aus dem Gansinger-Dolomit und dem Muschelkalk
 Analytiker: Institut Bachema, Zürich (7904/2-7904/7; Inst. Fresenius, Wiesbaden (7904, ohne Nr.)

Probennummer	7904/2	7904/3	7904/7	7904/6	7904/5	7904/4	7904(ohne Nr.)	
Entnahmedaten	14.1.80	4.2.80	5.3.80	28.2.80	26.2.80	12.2.80	22.7.81	
Entnahmetiefe in m u.T.	104,5-109,5	230	226,7-232,0	285,7-291,0	299,0-304,3	305,7	art. Überlauf	
Schicht	Gansinger-Dolomit	oberer Trigonodus-Dolomit	oberer Trigonodus-Dolomit	mittlerer Trochitenkalk	Dolomit der "Anhydritgruppe"	Ob. Sulfat-schichten der "Anhydritgruppe"	gesamte unverrohrte Bohrstrecke im Muschelkalk	
Komponenten								
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
<u>Kationen</u>								
Ammonium	NH ₄ ⁺	7,2	1,7	1,45	1,5	2,5	2,1	n.n.
Lithium	Li ⁺	1,30	2,95	2,95	2,44	2,78	2,80	2,80
Natrium	Na ⁺	4100	1230	1220	1210	1170	1050	1127
Kalium	K ⁺	48	108	106	108	129	108	86,6
Magnesium	Mg ⁺⁺	210	183	202	208	189	174	202,6
Calcium	Ca ⁺⁺	508	655	695	650	620	574	638,5
Strontium	Sr ⁺⁺	8,7	8,5	6,6	7,8	8,3	8,5	11,80
Mangan	Mn ⁺⁺	0,08	0,12	0,065	0,32	0,36	0,16	0,017
Eisen	Fe ⁺⁺	5,4	6,2	5,95	20,0	21,7	8,7	7,00
Kupfer	Cu ⁺⁺	0,11	0,03	0,0015	0,0025	< 0,001	0,03	0,004
Silber	Ag ⁺⁺	0,0065	0,0025	0,0015	0,0018	0,0018	0,0017	n.n.
Zink	Zn ⁺⁺	0,46	0,03	0,04	0,08	0,10	0,03	0,015
Cadmium	Cd ⁺⁺	0,0010	0,0007	0,0002	0,003	0,0002	0,0010	nicht best.
Blei	Pb ⁺⁺	0,017	0,012	0,032	0,003	0,009	0,013	n.n.
Aluminium	Al ⁺⁺⁺	0,031	0,026	0,003	0,004	0,008	0,014	n.n.
Summe Kationen		4889,31	2195,57	2240,09	2208,15	2143,76	1928,35	2076,33
<u>Anionen</u>								
Fluorid	F ⁻	2,5	2,8	1,5	1,6	1,6	3,2	2,6
Chlorid	Cl ⁻	2770	1440	1500	1410	1300	1240	1398,0
Bromid	Br ⁻	0,06	2,5	0,26	0,33	0,20	0,06	1,600
Jodid	J ⁻	2,2	0,21	0,21	0,10	0,21	0,21	n.n.
Nitrit	NO ₂ ⁻	< 0,005	< 0,005	0,010	0,10	0,007	0,055	n.n.
Nitrat	NO ₃ ⁻	0,5	< 0,1	0,4	0,3	0,5	1,6	n.n.
Hydr. carbonat	HCO ₃ ⁻	233	355	349	376	381	360	351,0
Sulfat	SO ₄ ²⁻	6760	2760	2830	2740	2820	2562	2648
Hydr. phosphat	HPO ₄ ²⁻	0,02	0,04	< 0,01	0,02	0,02	0,05	0,015
Hydr. arsenat	HAsO ₄ ²⁻	-	-	-	-	-	-	0,084
Molybdän	Mo	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,003	< 0,001	< 0,001	nicht best.
Sulfid	S ⁻	-	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Summe Anionen		9768,28	4560,55	4681,38	4528,45	4503,54	4167,18	4401,31
<u>Undissoziierte Bestandteile</u>								
Metokieselsäure	H ₂ SiO ₃	9,0	14,3	15,3	14,0	14,2	13,0	23,1
Orthoborsäure	H ₃ BO ₃	16,9	14,3	14,3	15,4	20,3	15,1	18,30
Summe der gelösten festen Bestandteile		14683	6785	6951	6766	6682	6124	6519

Der Trigonodus-Dolomit zeigt häufig eine grössere Porosität, verwittert drusig und gilt daher als wasserführend. Der Plattenkalk, aus gebankten Kalken und Dolomiten aufgebaut, wirkt kompakter und ist weniger durchlässig. Der Trochitenkalk schliesslich zeigt in seinen tieferen Lagen ebenfalls gröbere Poren, die teilweise sogar kavernöse Strukturen ergeben und eine vergrösserte Wasserzirkulation gestatten (Tabelle 24).

Tabelle 27: Gehalt und Zusammensetzung der gelösten Gase in Wasserproben
 Analytiker: Eidgenössischen Institut für Reaktorforschung (EIR), Würenlingen

Wasserprobe Nr.	7904/3	7904/4	7904/5	7904/6	7904/7	7904(ohne Nr.)
Entnahmedaten	8.2.80	12.2.80	26.2.80	28.2.80	5.3.80	22.7.81
m Tiefe	220-240 ⁺	301 ⁺	299-304 [*]	286-301 [*]	227-232 [*]	artesischer überlauf ⁺⁺
Gesamtgasgehalt cm ³ NTP/kg	-	~35	41	40	40	67
Einzelkomponenten in Vol%						
He	0,56	0,55	0,51	0,48	0,37	0,36
CH ₄	0,06	Spur	0,02	0,02	0,05	0,02
N ₂	81,30	66	53,70	57,60	50,80	38,9
O ₂	2,40	1,30	0,27	0,19	2,40	0,04
Ar	1,50	1,10	0,94	1,03	0,96	0,69
CO ₂	14,30	31	44,60	40,70	45,40	60,0

Anmerkung : Für die Proben 7904/3-7904/7 erwies sich der relative Gehalt an CO₂ als etwas abhängig von Pumpzeit und Erwärmung (HCO₃-Zersetzung)

+ Wasserentnahme aus Bohrloch

* Wasserentnahme mit Doppelpacker

++ aus unverrohrtem Intervall 203m - 321,8m (Endtiefe)

10.6.2 Druckverhältnisse

Beim Durchfahren des Trigonodus-Dolomits trat aus seiner oberen Partie artesisch gespanntes Wasser aus, das einen Überdruck von ca. 15 m ü. T. aufwies und auf Terrainhöhe mit ca. 16,1 l/min aus dem Bohrloch ausfloss. Die tieferen Partien des Trigonodus-Dolomits und der gesamte Plattenkalk zeigten dagegen keine zusätzlichen Wasseraustritte ins Bohrloch.

Das Wasser im Trochitenkalk wies ebenfalls einen artesischen Überdruck auf, der ca. 15 m ü. T. reichte. Auf Terrainhöhe betrug der Wasserausfluss 6,8 l/min, war also bei ungefähr gleichem artesischem Überdruck geringer als jener im Trigonodus-Dolomit.

10.6.3 Chemismus

Zwei Proben aus dem oberen Trigonodus-Dolomit und eine aus dem mittleren Trochitenkalk weisen eine sehr ähnliche chemische Zusammensetzung auf (Tabelle 26). Gemäss der chemischen Klassifikation handelt es sich um ein Na-Ca-Mg-SO₄-Cl-Thermalwasser mit Li, Fe, F und Br. Die Summe der gelösten festen Bestandteile erreicht 6766 bis 6951 mg/l.

Das Temperatur-Log zeigt für den Trigonodus-Dolomit eine Wassertemperatur von ca. 26,3 °C, für den mittleren Trochitenkalk eine solche von ca. 27,2 °C an.

10.7 Mittlerer Muschelkalk

10.7.1 Wasserführung

Die Bohrung durchteufte bis 321,8 m noch 30,4 m des mittleren Muschelkalks, umfassend 11,45 m Dolomit der «Anhydritgruppe» und darunter die obersten Mergel und Anhydrite der Oberen Sulfatschichten der «Anhydritgruppe». Als Grundwasser sind dabei lediglich die porösen, teils sogar kavernösen Dolomite zu betrachten, während die Gesteine der Oberen Sulfatschichten sich als dicht und trocken erwiesen (Tabelle 24).

10.7.2 Druckverhältnisse

Aus dem Dolomit der «Anhydritgruppe» trat artesisch gespanntes Wasser in die Bohrung aus, dessen Überdruck gleich jenem aus den Schichten des oberen Muschelkalkes war und zu ca. 15 m ü. T. gemessen wurde. Auf Terrainniveau betrug die aus diesen Schichten austretende Wassermenge rund 10,4 l/min.

10.7.3 Chemismus

In chemischer Beziehung unterscheiden sich die beiden aus dem Dolomit der «Anhydritgruppe» entnommenen Wasserproben kaum von den Proben aus dem oberen Muschelkalk (Tabelle 26). Bei etwas bescheidenerer Gesamtmineralisation als Summe der gelösten festen Bestandteile, verursacht in erster Linie durch geringeren Na⁺-, Ca²⁺- und Cl⁻-Gehalt, liegt im Dolomit der «Anhydritgruppe» der Gehalt an Ammonium NH₄⁺ und Nitrat NO₃⁻ etwas über jenem im oberen Muschelkalk. Im übrigen entspricht der Chemismus weitgehend jenem von Wässern aus dem oberen Muschelkalk. Die Wassertemperatur im Dolomit der «Anhydritgruppe» beträgt gemäss Temperatur-Log rund 27,3 °C.

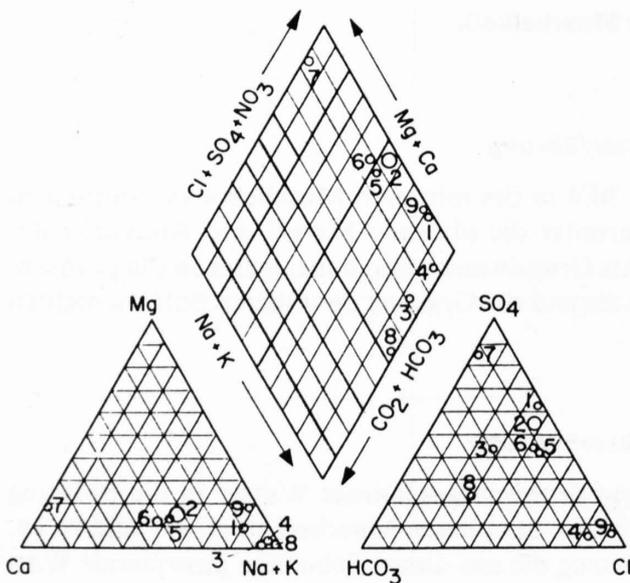
10.8 Gehalt der Tiefenwässer an gelösten Gasen und deren Zusammensetzung

Durch das Eidgenössische Institut für Reaktorforschung (EIR) wurden 6 Wasserproben aus dem Muschelkalk auf ihren Gasgehalt analysiert. Die Resultate sind in Tabelle 27 zusammengestellt. Daraus ergibt sich, dass der Gehalt an gelösten Gasen in erster Linie durch den Stickstoff, in zweiter Linie durch das CO_2 bedingt ist. Sauerstoff und Argon spielen eine untergeordnete Rolle, Methan ebenfalls. Hingegen erscheint das Helium in immerhin 0,37–0,56 Volumen-%. Dieser relativ hohe Prozentanteil von Helium, das vermutlich ursprünglich aus dem Kristallin des Grundgebirgssockels stammen könnte, wird vom Analytiker in Zusammenhang mit dem α -Zerfall von Uran und Thorium gebracht.

10.9 Chemismus der Keuper- und Muschelkalkwässer in der Kernbohrung Nr. 7904, Beznau, im Vergleich zu einigen andern schweizerischen Mineralquellen

Aus Figur 19 ist ersichtlich, dass die aus dem Muschelkalk austretenden chemisch sehr ähnlichen Wässer am ehesten mit den Thermalwässern von Baden zu vergleichen sind, welche eine fast identische Verteilung der Haupt- und NebenkompONENTEN, hingegen eine etwas bescheidenere Gesamtmineralisation aufweisen.

Verglichen mit dem Wasser aus dem Gansinger-Dolomit, sind die Muschelkalkwässer in den Hauptkomponenten wesentlich reicher an Erdalkalien, in den NebenkompONENTEN reicher an Lithium, dagegen wesentlich ärmer an NH_4 , Cu, Zn und J.



Analysen aus der Kernbohrung Nr. 7904, Beznau

- 1 Gansinger-Dolomit
- 2 oberer Muschelkalk

Zum Vergleich:

- 3 Zurzach
- 4 Eglisau
- 5 Baden Verenaquelle
- 6 Baden Schwanenquelle
- 7 Eptingen
- 8 Aqvi Zürich (Brauerei Hürlimann)
- 9 Meerwasser

Figur 19: Chemismus der Wässer aus dem Gansinger-Dolomit und dem Muschelkalk im Vergleich zu einigen andern schweizerischen Mineralquellen, in mval-%.

10.10 Untersuchungen nach Abschluss der Bohrung

Die Bohrung wurde nach Abschluss der verschiedenen technischen, physikalischen und chemischen Untersuchungen nicht verfüllt. Das 89/78-mm-Stahlrohr, das bis auf 203 m reicht, wurde mit einer dichten Verschlusskappe abgeschlossen und mit einem Manometer (Genauigkeit $\frac{1}{100}$ bar) und Entnahmehahn versehen. Von August 1981 bis Juni 1982 wurden am festeingebauten Manometer folgende Ablesungen vorgenommen:

Tabelle 28: Manometerablesungen an der Kernbohrung Nr. 7904, Beznau

Datum	Druck in bar
7. 8.81	1,55
28. 10.81	1,59
15. 2.82	1,61
22. 2.82	1,60
1. 3.82	1,62
8. 3.82	1,62
15. 3.82	1,62
22. 3.82	1,63
29. 3.82	1,64
5. 4.82	1,65
19. 4.82	1,67
26. 4.82	1,66
3. 5.82	1,67
10. 5.82	1,68
17. 5.82	1,69
24. 5.82	1,68
1. 6.82	1,69
7. 6.82	1,68

Diese Daten zeigen über einen Zeitraum von rund 2 Jahren einen deutlichen Anstieg um gegen 0,2 bar auf ca. 1,7 bar. Da die Bohrung bis 203 m verrohrt ist, entspricht der gemessene Druck einem Mittel aus den verschiedenen Aquiferen des oberen Muschelkalks und der «Anhydritgruppe» im unverrohrten Bereich des Bohrlochs.

11. Isotopenanalysen für Altersbestimmungen

(W. Balderer, H. Loosli, H. Oeschger, Physikalisches Institut der Universität Bern,
Abteilung LLC und nukleare Geophysik)

An 6 Grundwasserproben der Kernbohrung Nr. 7904, Beznau, wurden Isotopenbestimmungen durchgeführt. Zusätzlich wurde der ^{18}O -Gehalt des Bohrspülwassers ermittelt. Die verschiedenen Analysendaten sind in Tabelle 29 zusammengestellt.

Diese Isotopenresultate müssen zu ihrer Deutung in einen grösseren regionalen Rahmen gestellt werden. Bis die Ergebnisse von tiefen Grundwässern aus den Sondierbohrungen der Nagra sowie von Mineralwässern und Thermen des regionalen Untersuchungsprogramms in der Nordschweiz vorliegen, erlauben die Resultate nur vorläufige und mit Unsicherheiten behaftete Aussagen. Die Möglichkeiten der einzelnen Isotopenmethoden, ihre Voraussetzungen und Grenzen der Anwendung sind im Technischen Bericht Nagra NTB 83-04 zusammengestellt.

11.1 Isotopenresultate an Wasserproben aus dem Gansinger-Dolomit (Keuper)

Das im Abschnitt 105,7–109,2 m entnommene Grundwasser unterscheidet sich nach dem ^{18}O -Gehalt in charakteristischer Weise von den im Muschelkalk derselben Bohrung angetroffenen Grundwässern. Ähnliche $\delta^{18}\text{O}$ -Werte wie für das Wasser des Gansinger-Dolomits ($-8,77\text{‰}$) wur-

den in der näheren Region für die Wässer der Quellen von Baden (VUATAZ 1981), der Quellen 2, 3 und 4 von Eglisau, der Quellen von Säckingen (Badquelle und St. Margarethen), der Magdalenquelle von Magden und der Bohrung Frenkendorf bestimmt (Nagra NTB X-475, in Vorbereitung). Da diese im $\delta^{18}\text{O}$ vergleichbaren Wässer aber wegen unterschiedlicher Deuteriumgehalte im $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ -Diagramm z. T. beträchtlich von der Niederschlagsgeraden abweichen, kann infolge des Fehlens einer Deuterium-Bestimmung für das Gansinger-Dolomit-Wasser der Bohrung 7904, Beznau, bezüglich Herkunft bzw. Infiltrationsbedingungen keine Zuordnung vorgenommen werden.

Nach dem Resultat der ^{14}C -Bestimmung ergibt sich, unter Berücksichtigung des $\delta^{13}\text{C}$ -Wertes und der Bikarbonat-Werte (d. h. Korrektur für aus dem Gestein in Lösung gegangenen Kohlenstoff ohne ^{14}C -Aktivität), eine Aufenthaltszeit von mindestens einigen tausend Jahren. Diese untere Grenze (von ca. 5000 bis 10000 Jahren) ist von den Modellannahmen abhängig und berücksichtigt weitere ^{14}C -Verluste infolge solcher Austauschprozesse nicht, die in den heute anwendbaren Modellen nicht erfasst werden. Da jedoch nicht ausgeschlossen werden kann, dass das während des Bohrbetriebs entnommene Gansinger-Dolomit-Wasser etwas Tritium ($5,6 \pm 3,9$ Tritiumeinheiten) enthält, kann auch eine geringe Kontamination durch Bohrspülwasser nicht ausgeschlossen werden. Somit könnte der effektive ^{14}C -Gehalt des reinen Grundwassers dieser Formation echt kleiner sein als die angegebene obere Grenze von $\leq 4,7\%$ modern.

11.2 Isotopenresultate an Wasserproben aus dem Oberen Muschelkalk

Während der Bohrphase konnten mit Tubing-Packer-Anordnung separate Wasserproben aus dem Trigonodus-Dolomit, dem Trochitenkalk und dem Dolomit der «Anhydritgruppe» entnommen werden. Die Bestimmungen an diesen Wasserproben ergaben nur wenig variierende Werte bezüglich der Isotopenkonzentration von ^{18}O , ^{14}C und ^{13}C . Da bisher an diesen Proben keine Tritium-Bestimmungen erfolgten, kann ein Einfluss einer eventuellen Spülwasserkontamination ($\delta^{18}\text{O} = 11,80\text{‰}$) nicht abgeschätzt werden. Es lässt sich nicht ausschliessen, dass ein Teil der Variationen dieser Ursache zuzuschreiben ist. Aus diesen Gründen beschränkt sich die folgende Interpretation auf die Werte der Probenahme vom 22. 7. 1981, d. h. rund 1 Jahr nach Abschluss der Bohrung. Diese Grundwasserprobe enthält keine nachweisbare Tritiumkonzentration (d. h. weniger als die sehr tiefen Nachweisgrenzen; in Übereinstimmung mit dem ^{85}Kr -Resultat).

Am Gehalt an stabilen Isotopen (^2H und ^{18}O) gemessen, zeigt das Wasser des Muschelkalks Ähnlichkeit mit dem in der Sondierbohrung Böttstein im Muschelkalk angetroffenen Grundwasser ($^2\text{H} = -78,2\text{‰}$, $^{18}\text{O} = -11,16\text{‰}$). Dies kann als ein Hinweis auf ähnliche Infiltrationsbedingungen (bezügl. Temperatur bzw. Höhenlage des Einzugsgebietes oder Klima) für das Muschelkalkwasser in den beiden nur rund 1,5 km voneinander entfernten Bohrungen gedeutet werden. Der Wert der $\delta^{34}\text{S}$ -Bestimmung liegt innerhalb des Wertebereichs der typischen Muschelkalkwässer dieser Region.

Das ^{39}Ar -Resultat erlaubt den Schluss, dass das Muschelkalkwasser der Bohrung Nr. 7904, Beznau, eine Verweilzeit von grösser als eintausend Jahren aufweisen muss.

Aufgrund der ^{14}C -Messung, welche ebenfalls einen Wert jenseits der Nachweisgrenze (0,4%) ergab, wird bei Anwendung der gegenwärtig zur Verfügung stehenden ^{14}C -Korrekturmodelle (WATEQF-ISOTOP- bzw. Wigley-Pearson-Modell) eine Verweilzeit von minimal 20000 bis 30000 Jahren berechnet. Da jedoch nach dem heutigen Stand der Forschung weitere Austauschvorgänge vermutet werden, welche einseitig die ^{14}C -Konzentration im Grundwasser verringern, entsprechende Korrekturmodelle jedoch erst in Ansätzen entwickelt sind, muss möglicherweise mit einer wesentlich kürzeren Verweilzeit gerechnet werden.

Allgemein wird die ^{14}C -Methode als nicht mehr unbedingt aussagekräftig betrachtet, wenn relativ positive $\delta^{13}\text{C}$ -Werte in Kombination mit kleinen ^{14}C -Konzentrationen des im Grundwasser gelösten anorganischen Kohlenstoffs gemessen werden. Dies trifft für alle hier diskutierten Proben zu. Es kann deshalb nach dem ^{39}Ar -Resultat eine Verweilzeit von grösser als 1000 Jahren, nach den ^{14}C -Messungen eine solche von grösser als 20000 Jahren angegeben werden.

11.3 Paläoklimatische Einflüsse

Obschon die an Grundwässern der Bohrung bestimmten $\delta^{18}\text{O}$ -Werte und derjenige für $\delta^2\text{H}$ relativ zu andern Muschelkalkwässern der Nordschweiz ziemlich negativ sind, können sie zum Nachweis eines Klimaeffekts nicht verwendet werden. Die Inputwerte sind dazu zuwenig systematisch bekannt, die Herkunft der Wässer ist unbekannt, und das als Spülwasser verwendete Leitungswasser weist sogar noch einen negativen Wert auf.

Auch die Edelgasgehalte können nicht zur Bestimmung von Infiltrationstemperaturen verwendet werden, weil Gasverluste bei der damaligen Probenahme nicht ausgeschlossen werden können. Ein Vergleich mit Grundwässern aus anderen Gebieten mit ähnlichen ^{14}C -Aktivitäten (United Kingdom - Triassic sandstones, BATH et al. 1979; ANDREWS and LEE 1979, ANDREWS et al. 1983) führt nicht weiter. Auch in diesen Bestimmungen wurde ein paläoklimatischer Effekt nicht immer nachgewiesen. Eine nähere Eingrenzung der vermuteten Verweilzeit der Beznau-Wässer ist mit Hilfe dieser Methoden nicht möglich.

Weitere Literatur zu Kapitel 11: BALDERER (in Vorbereitung), BALDERER et al. (in Vorbereitung), SCHMASSMANN et al. (in Vorbereitung), THURY et al. (in Vorbereitung).

Tabelle 29: Isotopenbestimmungen an Grundwasserproben der Kernbohrung Nr. 7904, Beznau

Resultate der durchgeführten Isotopenbestimmungen											
Tiefe (m)	Formation (↑ = artesisch)	Probenahme	Probenbezeichnung	³ H (TU)	¹⁸ O (‰)	δ ² H (‰)	¹⁴ C (% modern)	¹³ C (‰)	³⁹ Ar (% modern)	⁸⁵ Kr (dpm/cc)	δ ³⁴ S (‰) in SO ₄ ⁻⁻
105,7-109,2	Gansinger-Dolomit (Keuper)	14.1.80	7904/2	5,6±3,9 ⁺⁺	- 8,77 ⁺⁺		< 4,7°	-6,4°			
226,0-230,0	Trigonodus-Dolom. (ob. Muschelkalk)	4.2.80	7904/3		-11,18 ⁺⁺		0,7±0,3°	-6,4°			
226,7-232,0	id.	5.3.80	7904/7		-11,17 ⁺⁺		1,1±0,2°	-6,9°			
285,7-291,0	Trochitenkalk (ob. Muschelkalk)	28.2.80	7904/6		-11,60 ⁺⁺		1,7±0,3°	-6,4°			
299,0-304,0	Dolomit der "Anhydritgruppe" (ob. Muschelkalk)	26.2.80	7904/5		-11,33 ⁺⁺		1,0±0,2°	-6,7			
203,0-321,8	Spülwasser	20.5.80	7904/8		-11,80 ⁺⁺		-				
	Gesamte offene, unverrohrte Bohrstrecke im Muschelkalk (Trigonodus-Dolomit - Dolomit der "Anhydritgruppe")	22.7.81a	ohne Nr.	< 1,0 ⁺ ≤ 0,6 ⁺⁺	-11,09 ⁺	-81,2 ⁺	< 0,4 ⁺⁺	-5,4 ⁺⁺	< 5 ⁺⁺	0,091 ⁺⁺ ± 0,012 resp. < 3% modern	19,8 [*]

- 153 -

Analytiker: + Institut für Radiohydrochemie, Neuherrberg
 ++ Abteilung LLC Universität Bern
 ° AERE Harwell
 * Nielsen, Göttingen

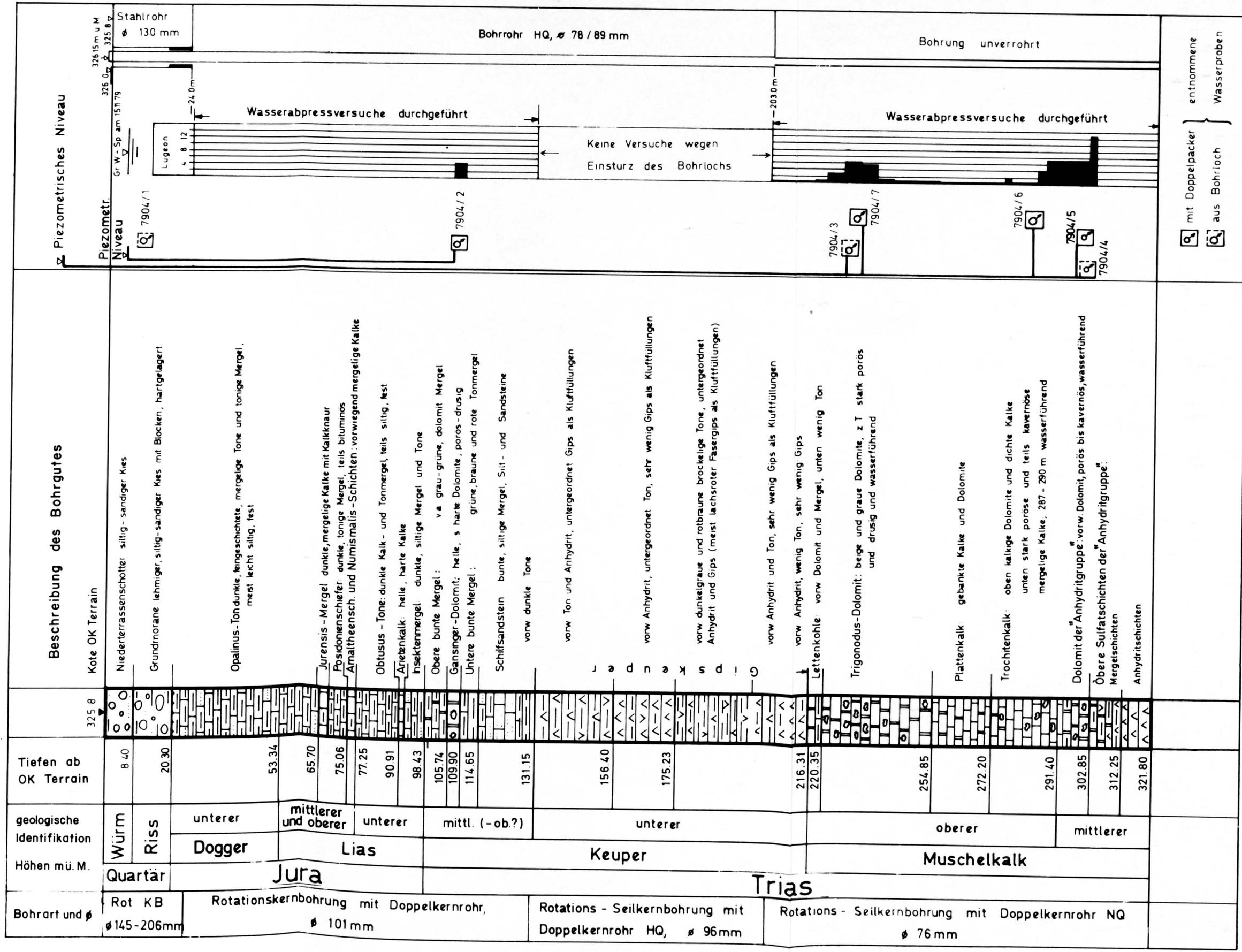
a Bei dieser Probenahme wurde zusätzlich eine Edelgasgehaltsbestimmung durch John Andrews, University of Bath durchgeführt. Diese ergab die folgenden Werte (cm³/cm³ Wasser bei Normal-Bedingungen STP): ⁴He: 4035 · 10⁻⁸, Ne: 1,91 · 10⁻⁷, Ar: 4,10 · 10⁻⁸, Kr: 14,98 · 10⁻⁸, Xe: 1,52 · 10⁻⁸ (Aufgrund der Probenmethode (Glaskörbchen) sind gewisse Gasverluste nicht auszuschliessen).

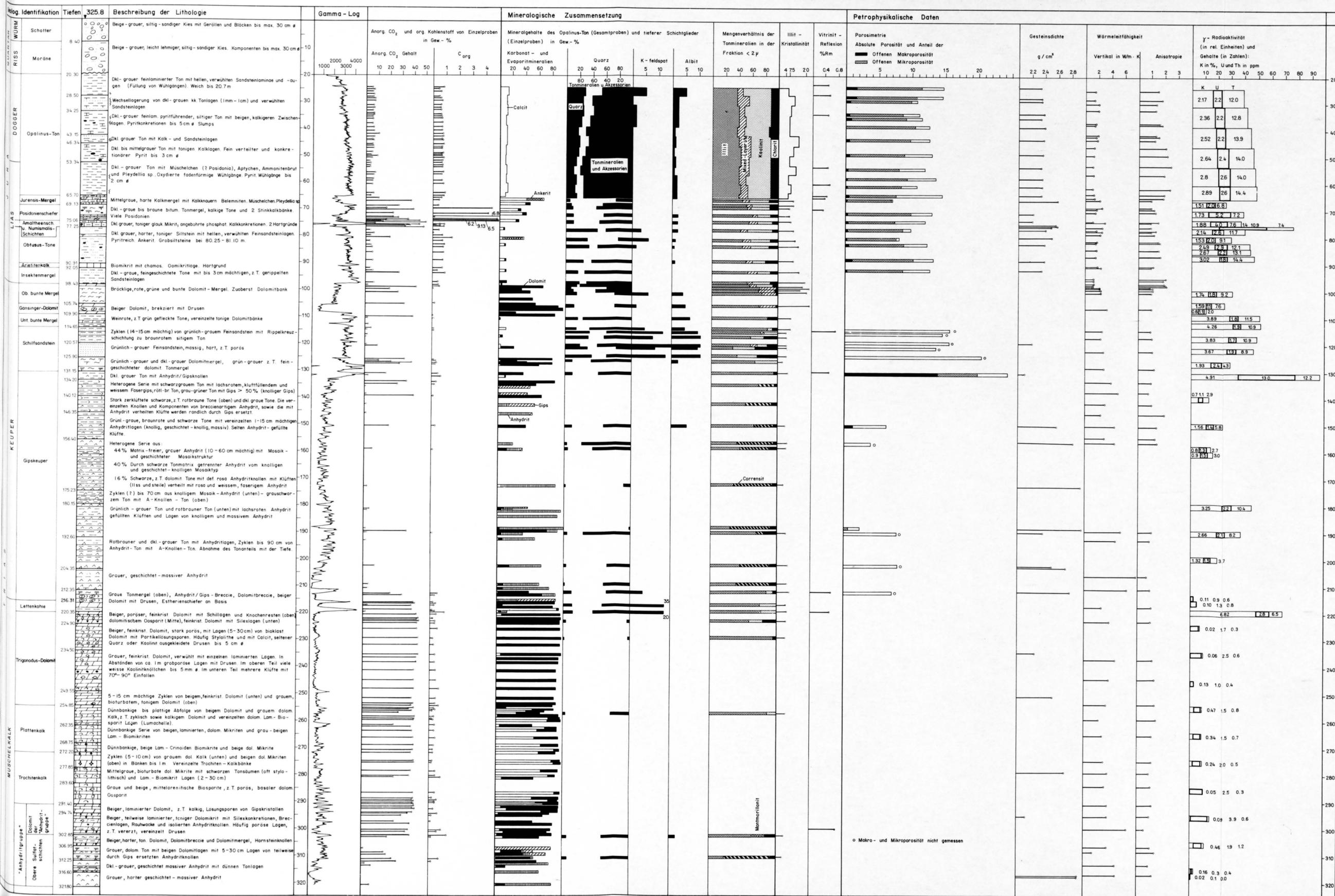
Literaturverzeichnis

- ANDREWS, J.N. and LEE, O.J. (1979): Inert gases in groundwater from the Bunter Sandstone as indicators of age and paleoclimatic trends. *J. Hydrol.* 41, 233-252.
- ANDREWS, J.W., BALDERER, W., BATH, A.H., CLAUSEN, H.B., EVANS, G.V., FLORKOWSKI, T., GOLDBRUNNER, J., IVANOVICH, M., LOOSLI, H. and ZÖJER, H. (1983): Environmental isotope studies in two aquifer systems. A comparison of groundwater dating methods. *Int. Symp. on Isotope Hydrology in Water Resources Development*, IAEA, Vienna.
- ASTIER, J.L. (1971): *Géophysique appliquée à l'hydrogéologie*. Masson & Cie, Paris.
- BADER, F., (1925): Beiträge zur Geologie des nordöstlichen Tafeljuras zwischen Aare und Rhein. Diss. Universität Zürich.
- BALDERER, W. (in Vorbereitung): Bedeutung der Isotopenmethoden bei der hydrogeologischen Charakterisierung potentieller Endlagerstandorte für hochradioaktive Abfälle. Nagra NTB 83-04.
- BALDERER, W., LOOSLI, H.H. und OESCHGER, H. (in Vorbereitung): Anwendung der Isotopenmethoden zur hydrogeologischen Charakterisierung potentieller Endlagerstandorte für hochradioaktive Abfälle in der Schweiz. Nagra NTB.
- BARKER, C. (1974): Pyrolysis techniques for source-rock evaluation. *Bull. amer. Assoc. Petroleum Geol.*, 58, 2349-2361.
- BATH, A.H., EDMUNDS, W.M. and ANDREWS, J.N. (1979): Paleoclimatic trends deduced from the hydrochemistry of a Triassic sandstone aquifer, United Kingdom. In: *Isotopic Hydrology 1978 Vol. II*, 545-568, IAEA, Vienna.
- BENDERS, W., FLEKKEN, P. und JACOBS, I. (1979): Anleitung zur Herstellung von Präparaten für die organisch-petrologische Untersuchung. KFA-ICH-5, Bericht Nr. 500874.
- BENTZ, A. (1961): Lehrbuch der angewandten Geologie - Band I, Kapitel 4.6 - Methoden der angewandten Geophysik - Bohrlochmessungen. Ferdinand-Enke-Verlag, Stuttgart.
- BOSTICK, N.H. (1979): Microscopic measurement of the level of catagenesis of solid organic matter in sedimentary rocks to aid exploration for petroleum and to determine for burial temperatures - A Review. *Spec. Publ. Soc. econ. Paleont. Mineral.* 26, 17-29.
- BRÄNDLIN, E. (1911): Zur Geologie des nördlichen Aargauer Tafeljuras zwischen Aare- und Fricktal. *Verh. natf. Ges. Basel* 22.
- BRAUN, L. (1920): Geologische Beschreibung von Blatt Frick (1:25 000) im Aargauer Tafeljura. *Verh. natf. Ges. Basel* 31, 1919-20.
- BROOKS, J. (1981): Organic maturation of sedimentary organic matter and petroleum exploration. A review. In: J. BROOKS (ed.): *Organic maturation studies and fossil fuel exploration*. Academic Press, London, 1-37.
- BRUNNER, H. (1973): Stratigraphische und sedimentpetrographische Untersuchungen am Unteren Keuper (Lettenkeuper, Trias) im nördlichen Baden-Württemberg. *Arb. Inst. Geol. Paläont. Univ. Stuttgart N. F.* 70, 1-85.
- CLARK, S.P. (1966): *Handbook of Physical Constants*. *Mem. geol. Soc. Amer.* 97.
- CLAYPOOL, G.E. and REED, P.R. (1976): Thermal analysis technique for source-rock evaluation: Quantitative estimate of organic richness and effects of lithologic variation. *Bull. amer. Assoc. Petroleum Geol.* 60, 608-612.
- DESBRANDES, R. (1968): *Théorie et interprétation des diagraphies*. Editions Technip, Paris.
- DOW, W. (1977): Kerogen studies and geological interpretation. *J. geochem. Explor.* 7, 2, 79-99.
- DURAND, B. (ed.), (1980): *Kerogen: insoluble organic matter from sedimentary rocks*. Editions Technip, Paris.
- DURAND, B. et ESPITALIÉ, J. (1973): Evolution de la matière organique au cours de l'enfouissement des sédiments. *C. R. Acad. Sci. (Paris)* 276, série D, 2253-2255.
- DURAND, B. and OUDIN, J.L. (1980): Exemple de migration des hydrocarbures dans une série deltaïque: le delta de la Mahakam, Kalimantan, Indonésie. *Proc. 10th World Petroleum Congr.* 1979, 2, 3-11.
- DURINGER, P. (1982): *Sédimentologie et paléocéologie du Muschelkalk supérieur et de la Lettenkohle (Trias germanique) de l'est de la France*. Diachronie des faciès et reconstitution des paléoenvironnements. *Diss. Univ. Strasbourg*.
- ERNI, A. (1910): Das Rhät im schweizerischen Jura. *Eclogae geol. Helv.* 11/1, 5-54.
- ESPITALIÉ, J., LAPORTE, J.L., MADEC, M., MARQUIS, F., LEPLAT, P., PAULET, J. et BOUTEFEU, A. (1977): Méthode rapide de caractérisation des roches mères, de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution. *Rev. Inst. franç. Pétrole* 32, 23-42.
- FLEKKEN, P. (1978): Anwendung organisch-geochemischer, kohlenpetrologischer und isotopengeochemischer Untersuchungsmethoden in der Faziesanalyse und der Kohlenwasserstoffexploration am Beispiel des NE-Randes des Pariser Beckens (Trias-Lias Luxemburg). *Diss. tech. Hochsch. Aachen*, 272.
- FÜCHTBAUER, H. (1959): Zur Nomenklatur der Sedimentgesteine. *Erdöl u. Kohle* 12. Jg., 605-613.
- GSELL, F. (1968): Geologie des Falten- und Tafeljuras zwischen Aare und Wittnau und Betrachtung zur Tektonik des Ostjuras zwischen dem Unteren Hauenstein im W und der Aare im E. *Mitt. geol. Inst. ETH u. Univ. Zürich N. F.* 91, 138.
- HAGEMANN, H.W. (1974): Petrographische und palynologische Untersuchung der organischen Substanz (Kerogen) in den liassischen Sedimenten Luxemburgs. In: TISSOT, BIENNER (ed.): *Advances in Organic Geochemistry 1973*, 29-37.
- HUDER, J. und AMBERG, G. (1970): Qellung in Mergel, Opalinus-Ton und Anhydrit. *Schweiz. Bauztg.* 43.
- HUNT, J.M. (1975): Origin of gasoline range alkanes in the deep sea. *Nature (London)* 254, 411-413.
- HUNT, J.M. (1979): *Petroleum geochemistry and geology*. W. H. Freeman and Co., San Francisco.
- HUNT, J.M., HUC, A.Y. and WHELAN, J.K. (1980): Generation of light hydrocarbons in sedimentary rocks. *Nature (London)* 288, 688-690.

- JÄCKLI, H. und KEMPF, TH. (1972): Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:100000, Blatt Bözberg - Bero-münster, mit Erläuterungen. Schweiz. Geotechn. Komm., Zürich.
- JÄCKLI, H. und RISSI, A. (1981): Die Kernbohrung Beznau 7904 - Vorläufige geologische Resultate. *Eclogae geol. Helv.* 74/1, 285-290.
- JACKSON, M. L. (1964): Specific surface measurements by glycerol sorption. *Soil Clay Min.*, 263-269.
- KAPPELMEYER, D. and HAENEL, R. (1974): Geothermics. Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- LEHNERT, K. und ROTHE, K. (1962): Geophysikalische Bohrlochmessungen. Akademie-Verlag, Berlin.
- LE TRAN, K. (1975): Analyse et étude des hydrocarbures gazeux occlus dans les sédiments. Exemples d'application à l'exploration pétrolière. *Bull. Cent. Rech. Pau-SNPA* 9, 223-243.
- LEYTHAEUSER, D., SCHAEFER, R. G. und WEINER, B. (1979a): Generation of low-molecular-weight hydrocarbons from organic matter in source beds as a function of temperature and facies. *Chem. Geol.* 25, 95-108.
- LEYTHAEUSER, D., SCHAEFER, R. G., CORNFORD, C. and WEINER, B. (1979b): Generation and migration of light hydrocarbons (C₂-C₇) in sedimentary basins. *Org. Geochem.* 1, 191-204.
- LEYTHAEUSER, D., HAGEMANN, H. W., HOLLERBACH, A. und SCHAEFER, R. G. (1980a): Hydrocarbon generation in source beds as a function of type and maturation of their organic matter: a mass balance approach. *Proc. 10th World Petroleum Congr.* 1979, 2, 31-41.
- LEYTHAEUSER, D., SCHAEFER, R. G. und YÜKLER, A. (1980b): Diffusion of light hydrocarbons through near-surface rocks. *Nature (London)* 284, 522-525.
- LEYTHAEUSER, D., SCHAEFER, R. G. und POOCH, H. (1983): Diffusion of light hydrocarbons in subsurface sedimentary rocks. *Bull. amer. Assoc. Petroleum Geol.* 67, 889-895.
- MADSEN, F. T. (1976): Quelldruckmessungen an Tonsteinen und Berechnung des Quelldrucks nach DLVO-Theorie. *Mitt. Inst. Grundbau u. Boden-mech. ETH Zürich*, Nr. 108, 65.
- MAIKLEM, W. R., BEBOUT, D. G. and GLAISTER, R. P. (1969): Classification of Anhydrite - A practical approach. *Bull. canad. Petroleum Geol.* 17, 194-233.
- MERKI, P. (1961): Der Obere Muschelkalk im östlichen Schweizer Jura. *Eclogae geol. Helv.* 54/1, 138-219.
- MUKHOPADHYAY, P. K., GORMLY, J. R. und WELTE, D. H. (1983): Classification of kerogens based on hydrocarbon potential and maturation. *Terra Cognita* 3, 2-3.
- MÜLLER, G. (1964): Methoden der Sedimentuntersuchung. *Sediment-Petrologie Teil I*. Schweizerbart-sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- MÜLLER-VON MOOS, M. (1971): Zur Korngrößenfraktionierung tonreicher Sedimente. *Schweiz. mineral. petrogr. Mitt.* 51/1, 245-257.
- OTTENJANN, K., TEICHMÜLLER, M. und WOLF, M. (1974): Spektrale Fluoreszenzmessungen an Sporininen mit Auflichtanregung, eine mikroskopische Methode zur Bestimmung des Inkohlungsgrades gering inkohlter Kohlen. *Fortschr. Geol. Rheinl. Westfal.* 24, 1-36.
- PETERS, T. (1964): Tonmineralogische Untersuchungen an einem Keuper-Lias-Profil im Schweizer Jura (Frick). *Schweiz. mineral.-petrogr. Mitt.* 44/2, 559-588.
- PHILIPPI, G. T. (1975): The deep subsurface temperature controlled origin of the gaseous and gasoline-range hydrocarbons of petroleum. *Geochim. cosmochim. Acta* 39, 1353-1373.
- POWELL, T. G., CREANEY, S. and SNOWDON, L. R. (1982): Limitations of the use of Organic Petrographic Techniques for Identification of Petroleum Source Rocks. *Bull. amer. Assoc. Petroleum Geol.* 66/4, 430-435.
- PRASAD, N. (1974): Sedimentology of Keuper from the Belchen-Tunnel eastern Swiss Juras. *Diss. Univ. Basel*, verkürzte Fassung, 16.
- RADKE, M., SITTARDT, H. G. und WELTE, D. H. (1978): Removal of soluble organic matter from rock samples with a flow-through extraction cell. *Analyt. Chem.* 50, 663-665.
- RADKE, M., WILLSCH, H. und WELTE, D. H. (1980): Preparative hydrocarbon group type determination by automated medium pressure liquid chromatography. *Analyt. Chem.* 52, 406-411.
- RYBACH, L. (1971): Radiometric Techniques. In: WAINARDI, R. E. & UKEN, E. A. (eds.): *Modern Methods of Geochemical Analysis*. Plenum Press, New York, 271-318.
- RYBACH, L. (1976): Radioactive Heat Production: A Property Determined by the Chemistry of Rocks. In: STERNS, R. G. J. (ed.): *The Physics and Chemistry of Minerals and Rocks*. Wiley & Sons, London, 309-318.
- SCHAEFER, R. G., WEINER, B. and LEYTHAEUSER, D. (1978): Determination of sub-nanogram per gram quantities of light hydrocarbons (C₂-C₆) in rock samples by hydrogen stripping in the flow system of a capillary gas chromatograph. *Analyt. Chem.* 50, 1848-1854.
- SCHAEFER, R. G., LEYTHAEUSER, D. and VON DER DICK, H. (1983): Generation and migration of low-molecular-weight hydrocarbons in sediments from Site 511 of DSDP/IPOD Leg 71, Falkland Plateau, South Atlantic. In: BJOROY, M. et al. (eds.): *Advances in Organic Geochemistry 1981*, Wiley & Sons, Chichester, 164-174.
- SCHÄRLI, U. (1980): Methodische Grundlagen zur Erstellung eines Wärmeleitfähigkeits-Katalogs schweizerischer Gesteine. Unveröff. Diplomarb. ETH-Z.
- SCHMASSMANN, H., BALDERER, W. und PEKDEGER, A. (in Vorbereitung): Regionale Untersuchungen über die Beschaffenheit von Grundwässern. *Nagra NTB*.
- SHELL (1976): *Standard Legend Exploration and Production Departments*, Royal Dutch Shell Group of Companies. Shell Internationale Petroleum Mij. B. V., The Hague.
- SHOTHERM QTM D1: *Shotherm Operation Manual No. 126*. Showa Denko K. K. Tokyo, Japan.
- STACH, E., MACKOWSKY, M. T., TEICHMÜLLER, M., TAYLOR, G. H., CHANDRA, D. and TEICHMÜLLER R. (1982): *Coal Petrology*. Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.

- TEICHMÜLLER, M. (1982): Fluoreszenz von Liptiniten und Vitriniten in Beziehung zu Inkohlungsgrad und Verkokungsverhalten. Geol. Landesamt Nordrhein-Westfalen, Krefeld.
- TEICHMÜLLER, M. and DURAND, B. (1983): Fluorescence microscopical rank studies on liptinites and vitrinites in peat and coals, and comparison with results of the Rock-Eval pyrolysis. *Int. J. Coal Geol.* 2, 197-230.
- THOMPSON, K.F.M. (1979): Light hydrocarbons in subsurface sediments. *Geochim. cosmochim Acta* 43, 657-672.
- THURY, M. et al. (in Vorbereitung): Hydrogeologische Verhältnisse des Untergrundes in der Nordschweiz. Nagra NTB.
- TISSOT, B., CALIFET-DEBYSER, Y., DEROO, G. and OUDIN, J.L. (1971): Origin and evolution of hydrocarbons in Early Toarcian shales, Paris Basin, France. *Bull. amer. Assoc. Petroleum Geol.* 55, 2177-2193.
- TISSOT, B., DURAND, B., ESPITALIÉ, J. and COMBAZ, A. (1974): Influence of nature and diagenesis of organic matter in formation of petroleum. *Bull. amer. Assoc. Petroleum Geol.* 58, 499-506.
- TISSOT, B. and WELTE, D.H. (1978): Petroleum formation and occurrence. Springer-Verlag, Berlin.
- ULRICH, M. (1982): Zur Stratigraphie und Fossilführung des Lettenkeupers (Ob. Trias) bei Schwäbisch Hall (Baden-Württemberg). *Jber. Mitt. oberrh. geol. Ver. N.F.* 64, 213-224.
- VUATAZ, F.D. (1982): Hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de Suisse et des régions alpines limitrophes. *Matér. Géol. Suisse, Hydrol.* 29.
- WURSTER, P. (1964): Geologie des Schilfsandsteins. *Mitt. geol. Staatsinst. Hamb.*
- WURSTER, P. (1968): Paläogeographie der deutschen Trias und die paläogeographische Orientierung der Lettenkohle in Südwestdeutschland. *Eclogae geol. Helv.* 61/1, 157-166.





Opalinus - Ton

24.23 - 24.32

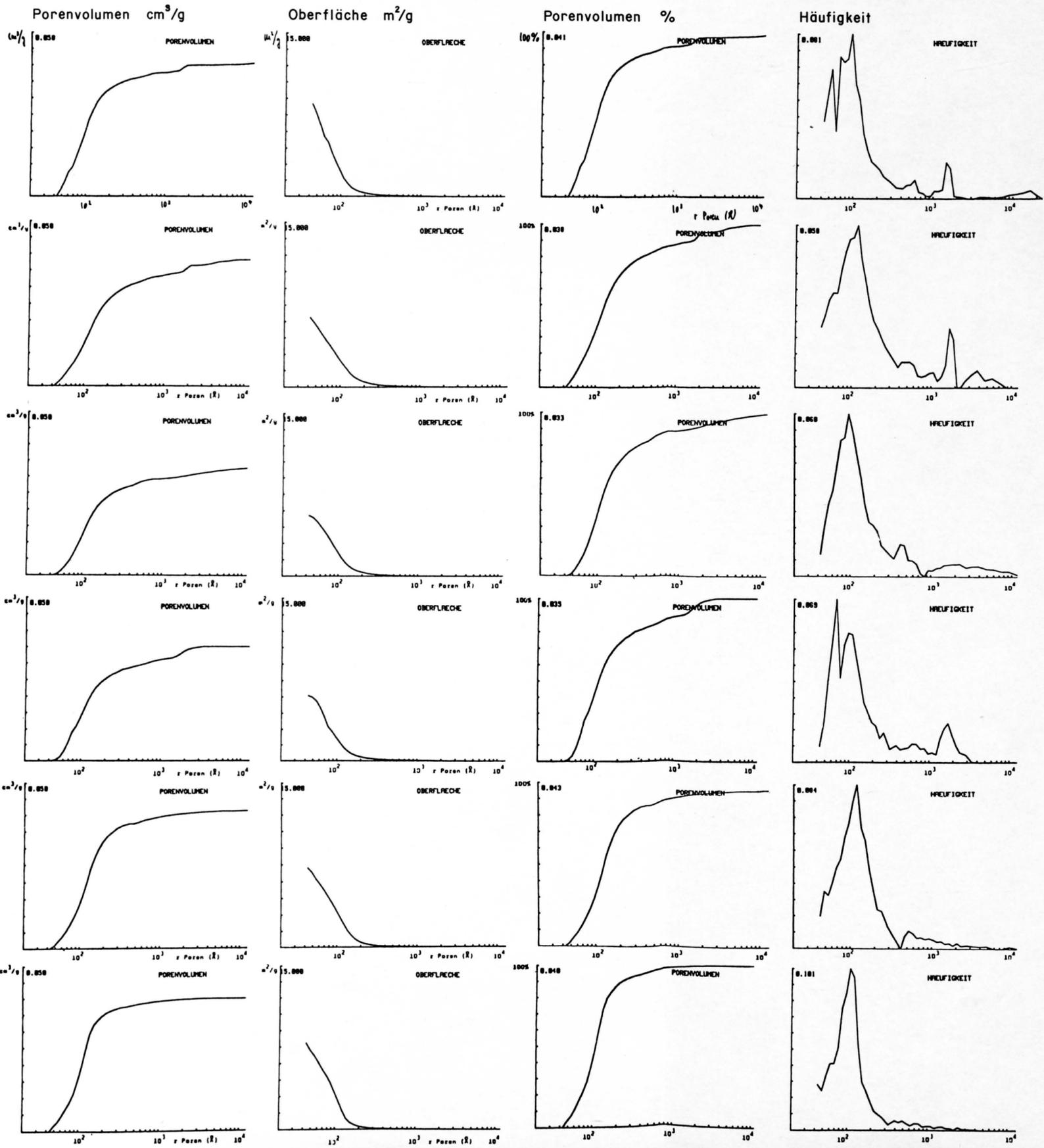
29.39 - 29.53

34.32 - 34.40

35.91 - 35.98

38.13 - 39.20

43.93 - 44.03



Opalinus - Ton

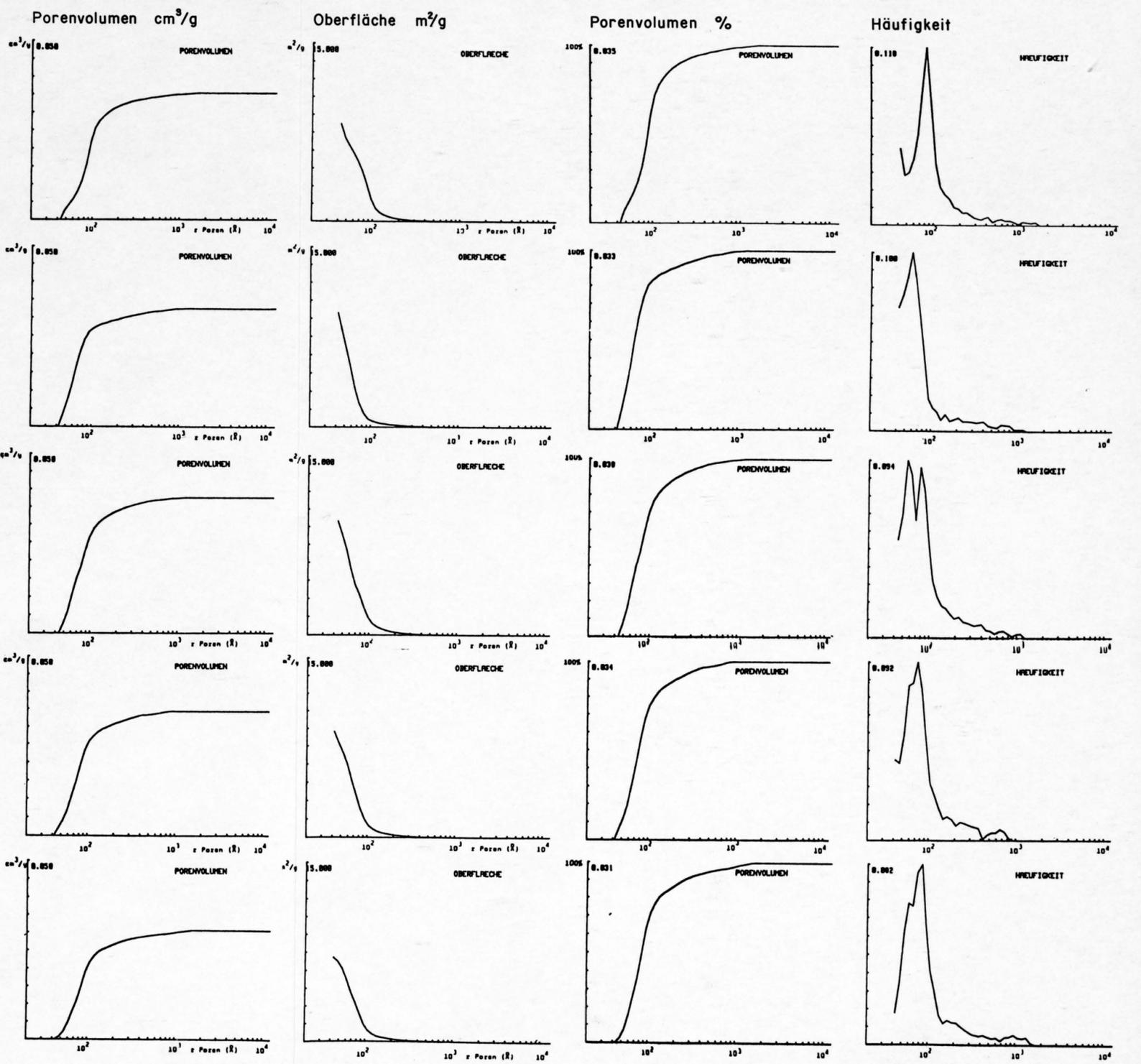
49.21 - 49.30

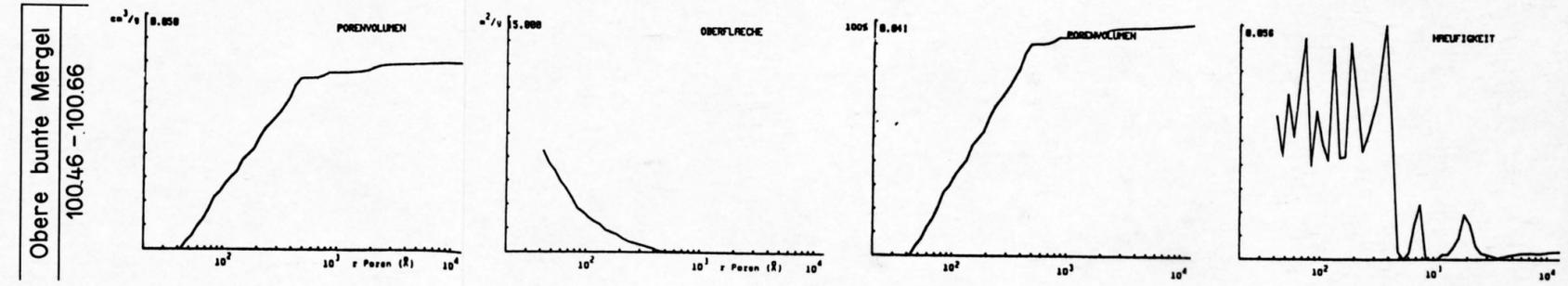
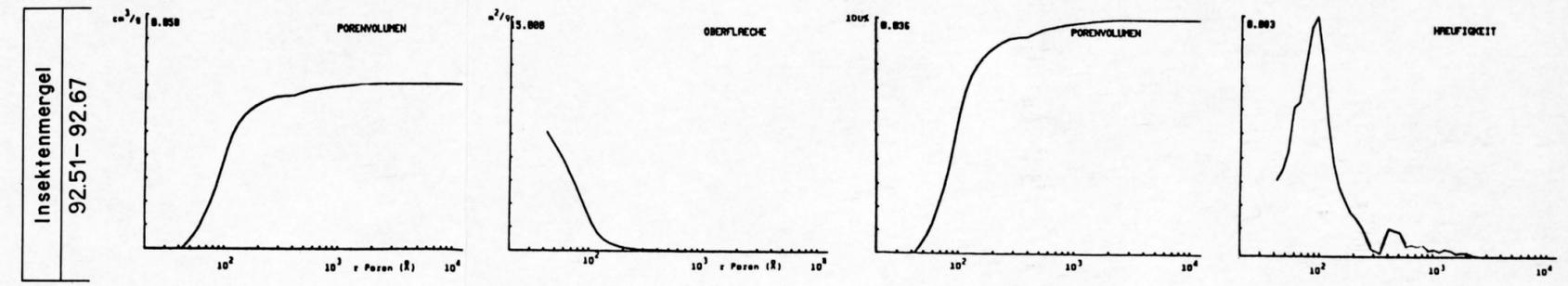
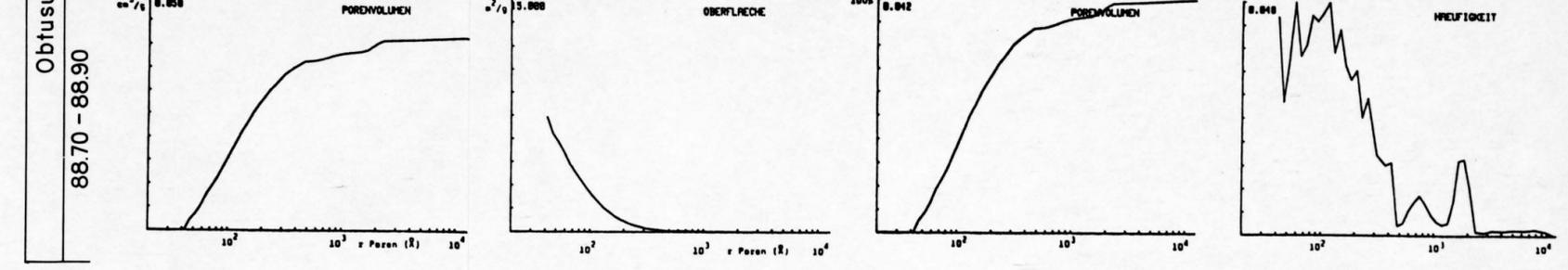
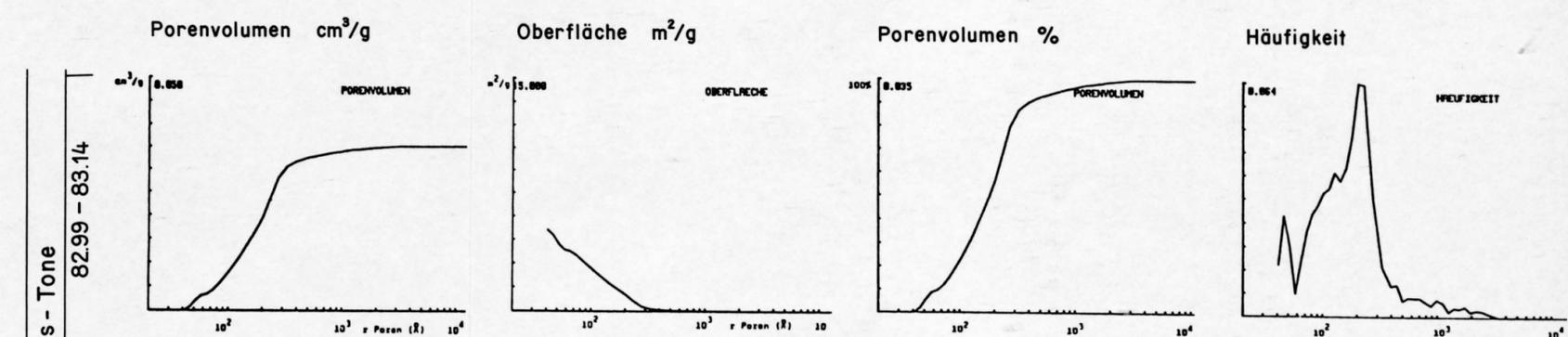
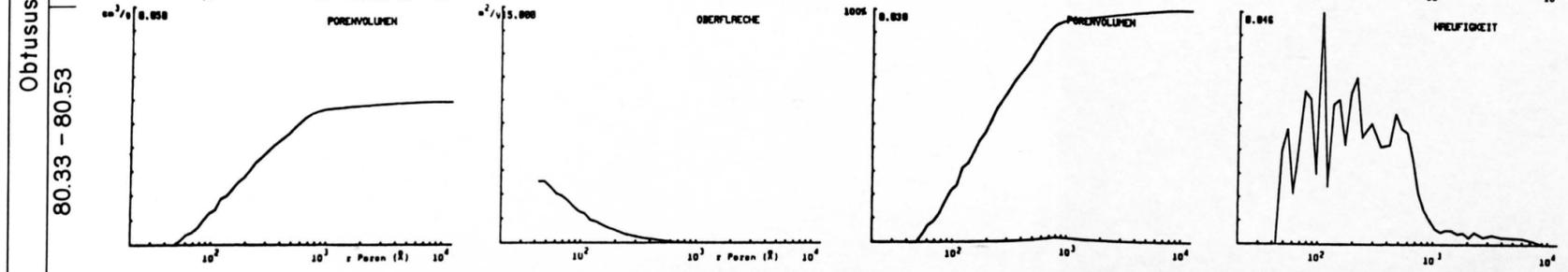
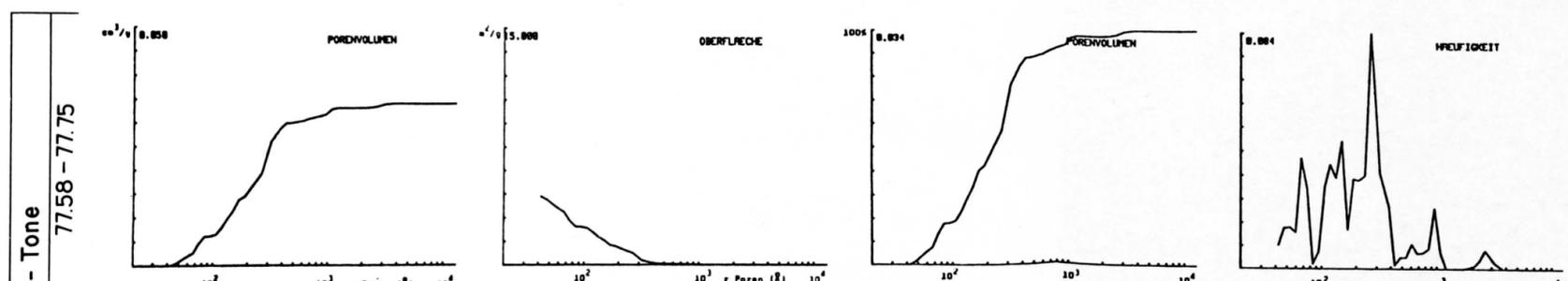
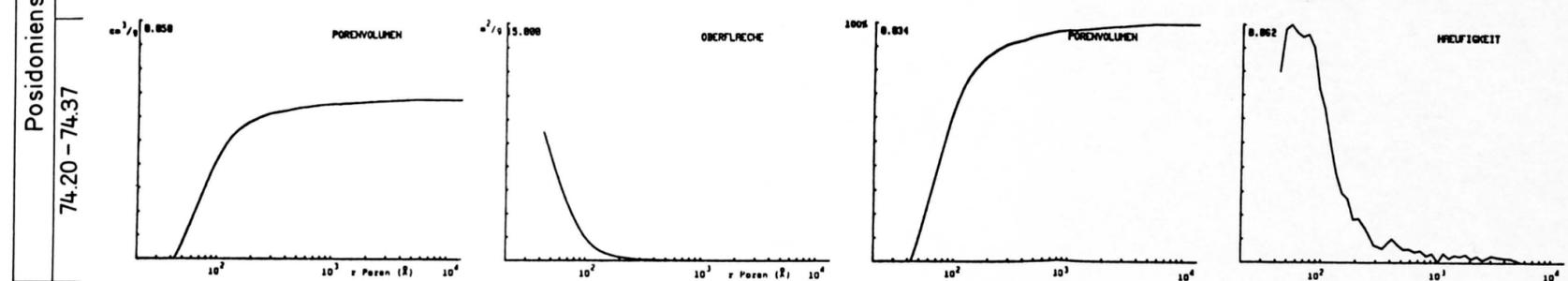
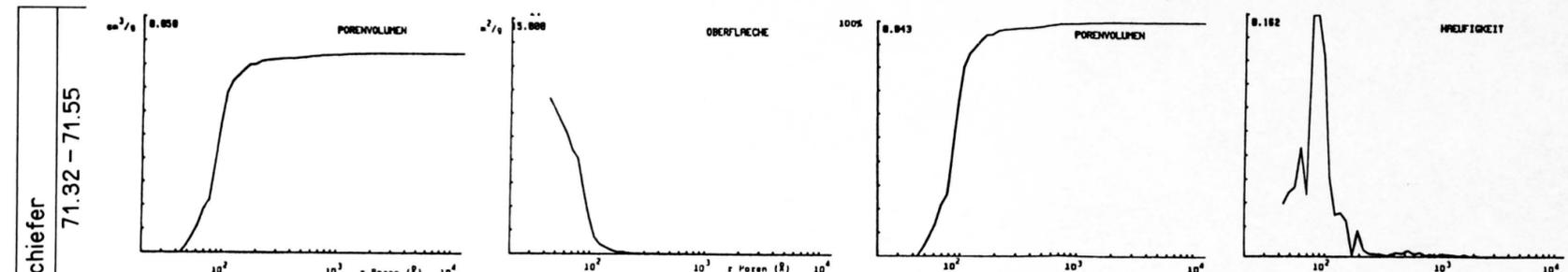
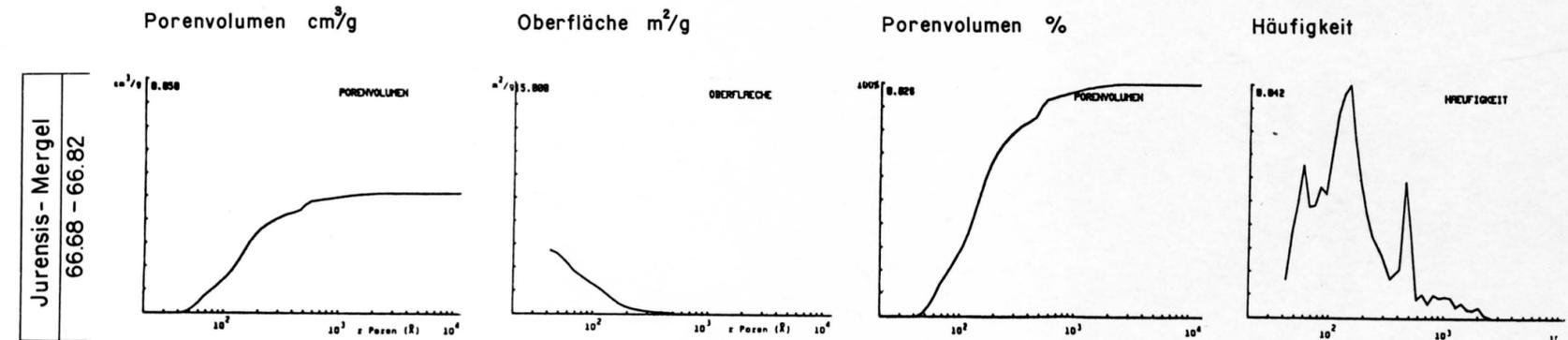
54.20 - 54.34

58.53 - 58.63

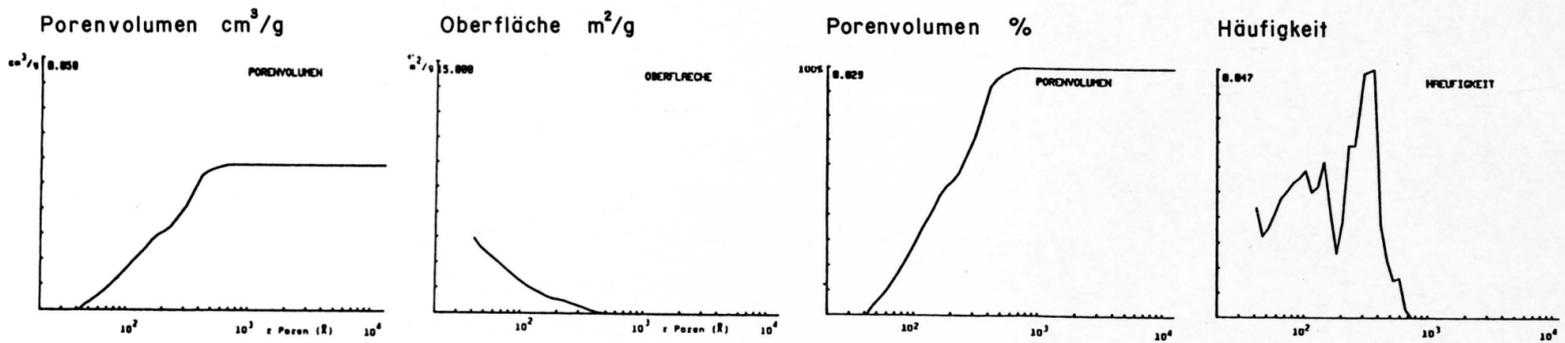
61.49 - 61.60

64.75 - 64.95

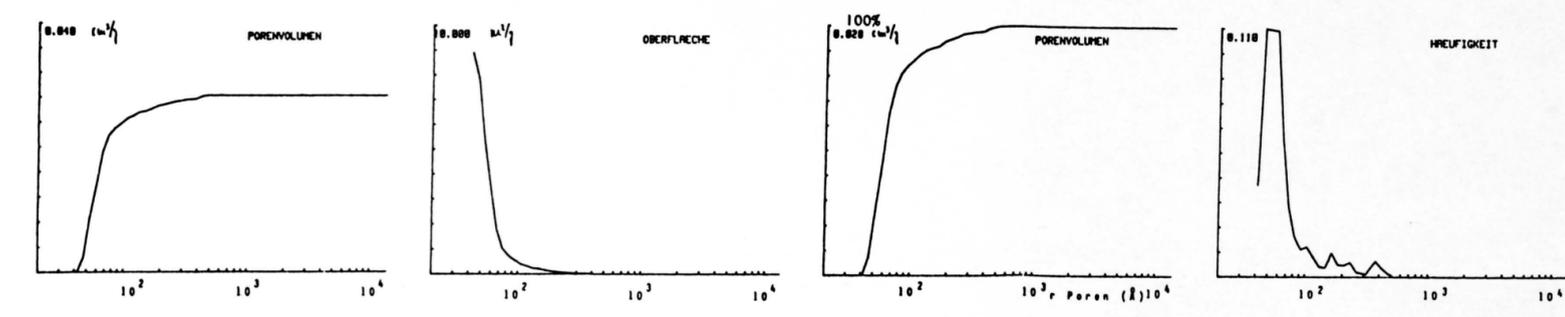




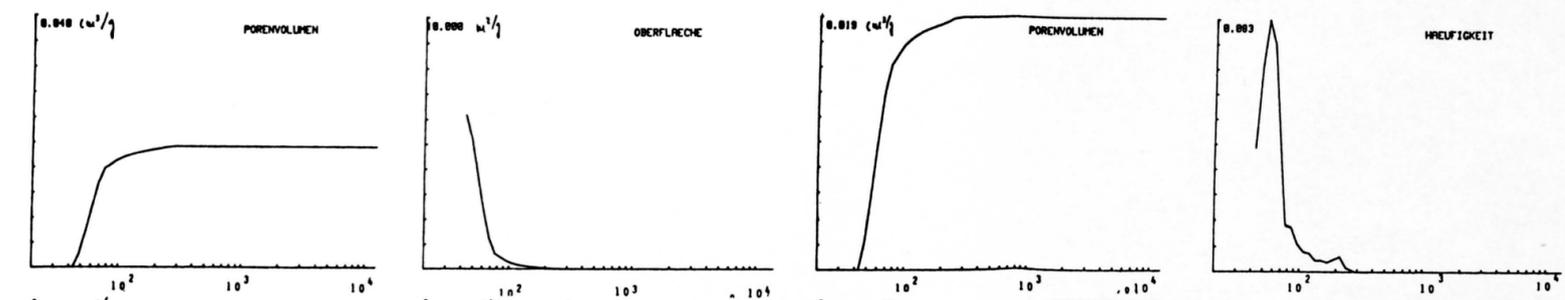
Obere bunte Mergel
104.95 - 105.05



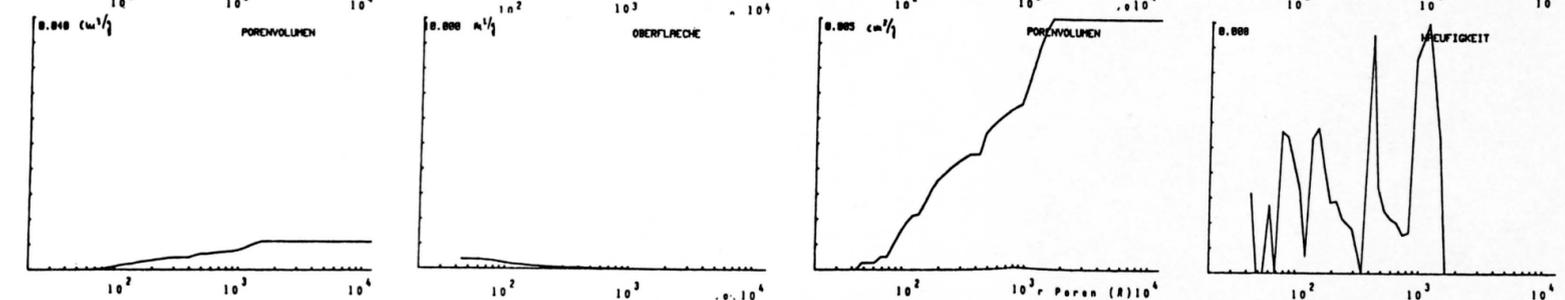
Schilfsandstein
130.92 - 131.00



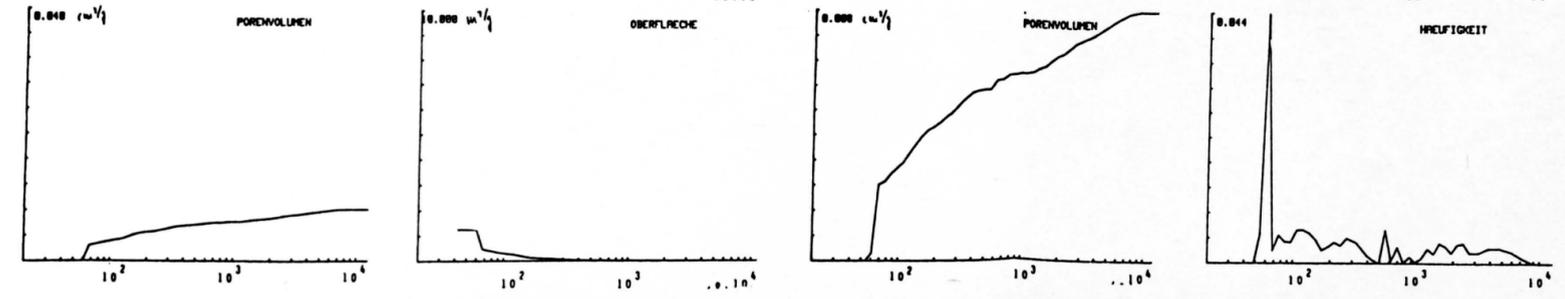
Gipskeuper
150.25 - 150.40



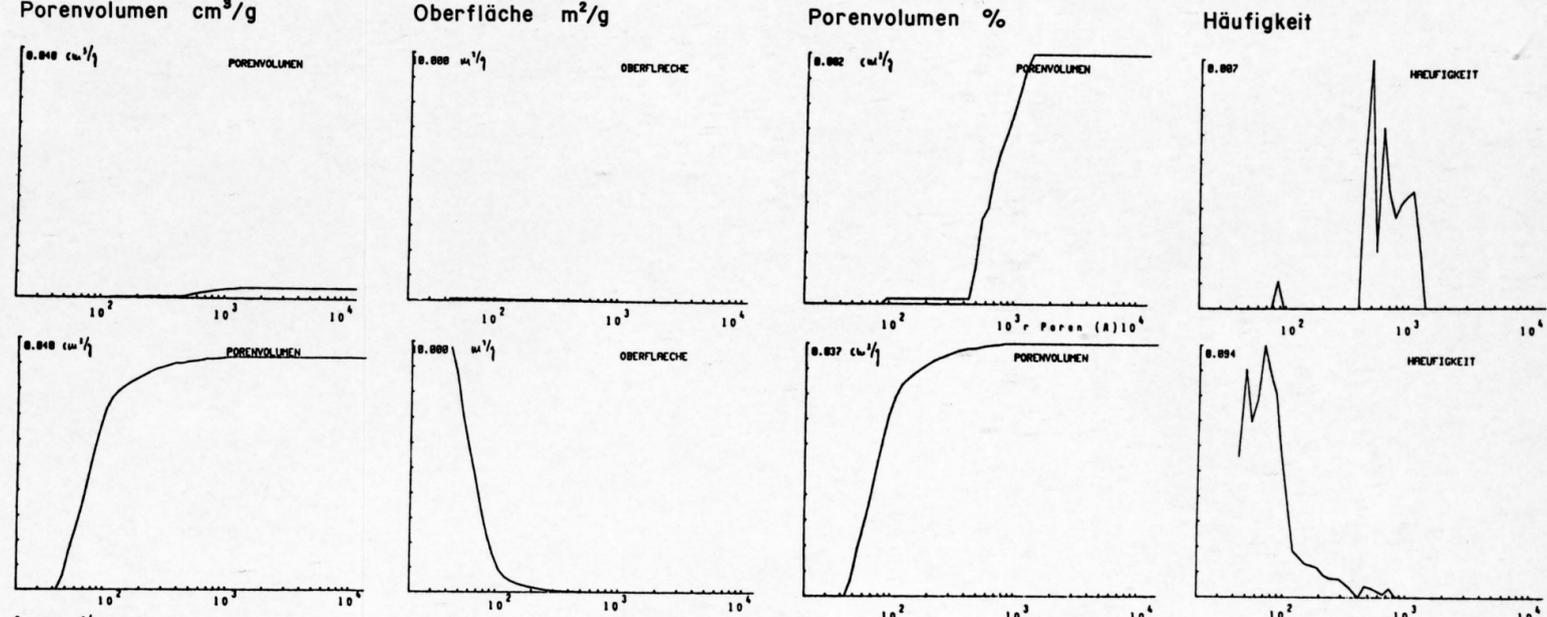
Gipskeuper
156.72 - 156.82



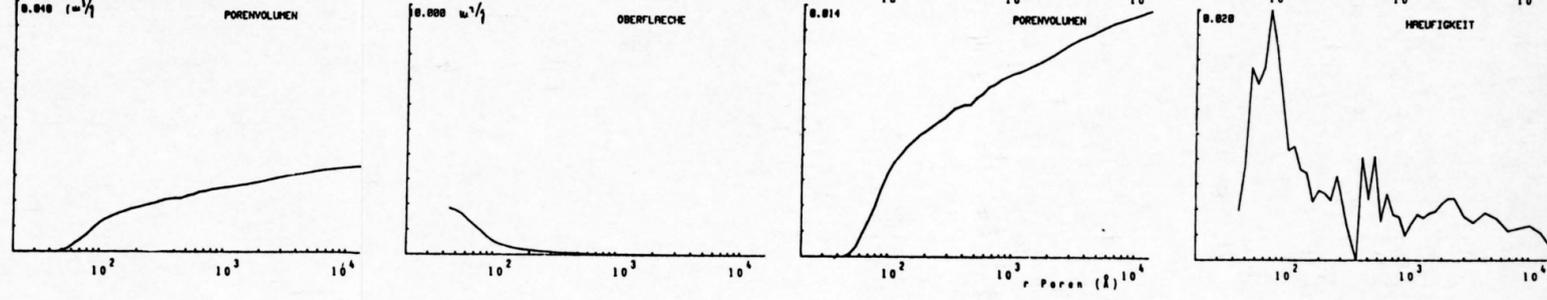
Gipskeuper
172.65 - 172.86



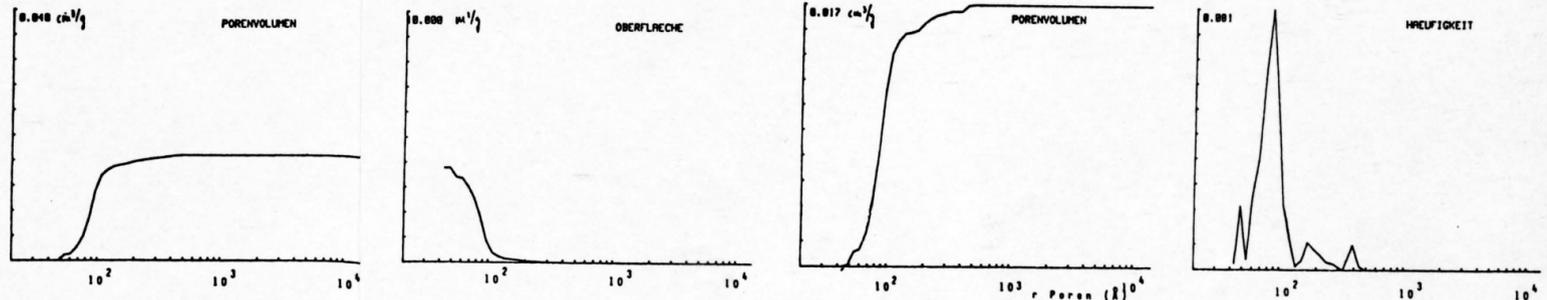
Gipskeuper
190.05 - 190.10



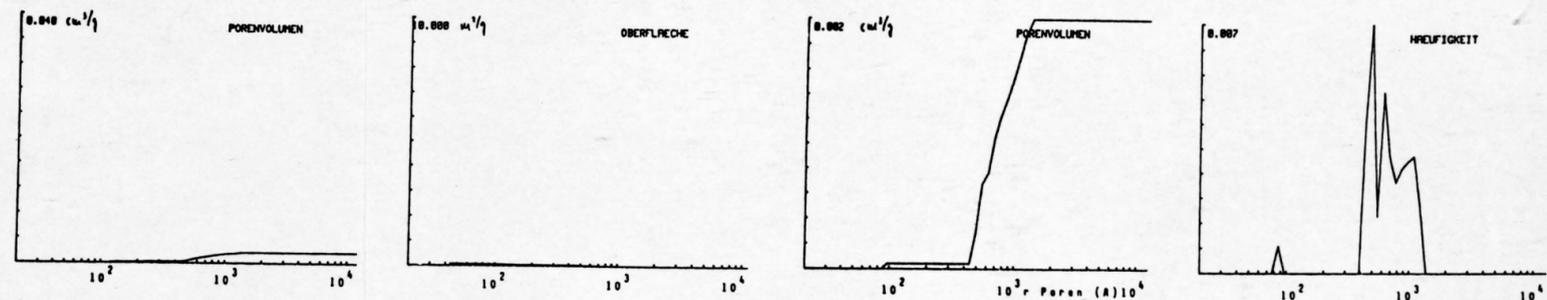
Plattenkalk
202.50 - 202.55



Plattenkalk
262.78 - 262.85



188.50 - 188.59



Opalinus - Ton

Lufttrocken Ca²⁺

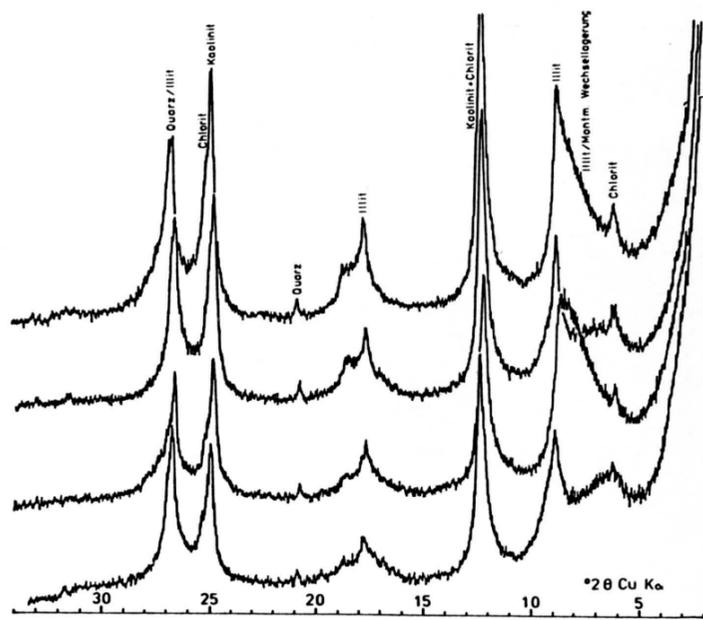
63.98 - 65.73

Aethylenglykol

Lufttrocken Ca²⁺

27.68 - 31.04

Aethylenglykol

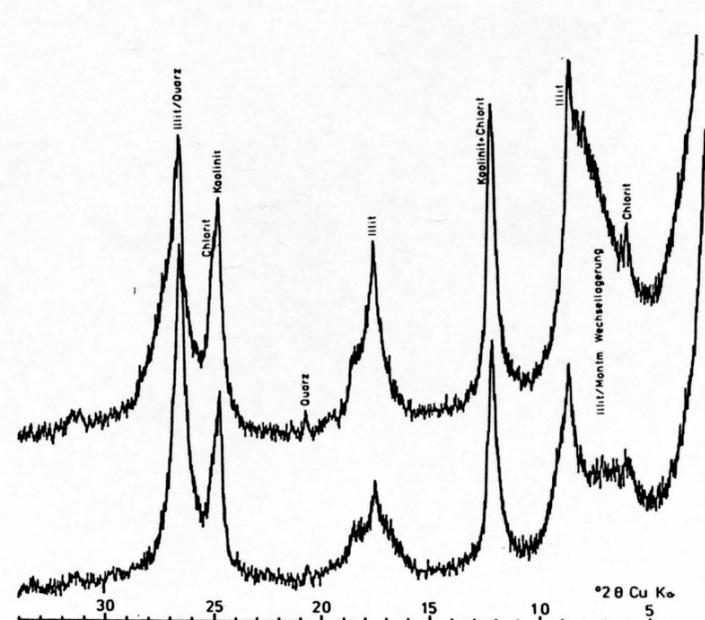


Insektenmergel

92.51 - 92.67

Lufttrocken Ca²⁺

Aethylenglykol



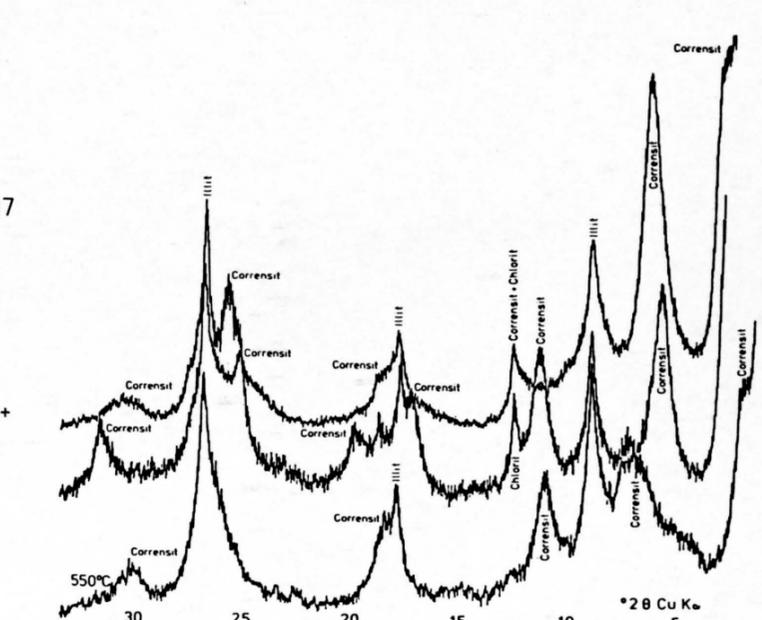
Gipskeuper

159.00 - 159.17

Lufttrocken Ca²⁺

Aethylenglykol

550 ° C

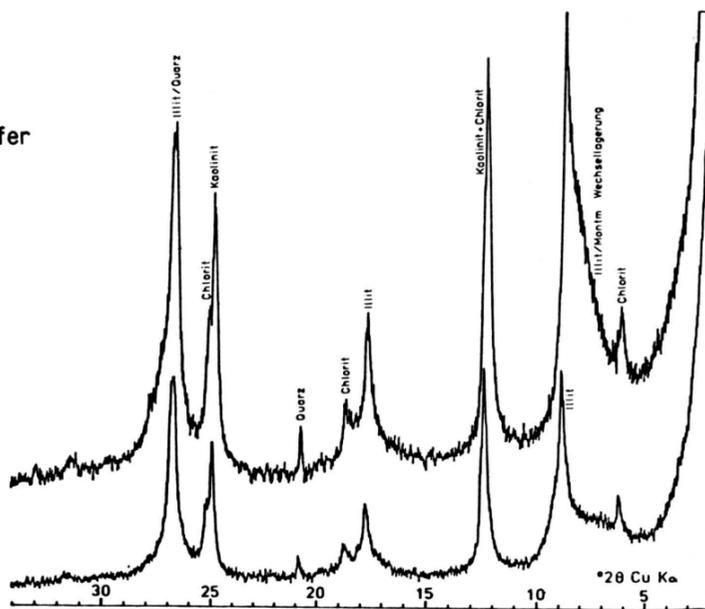


Posidonienschiefer

71.32 - 71.55

Lufttrocken Ca²⁺

Aethylenglykol

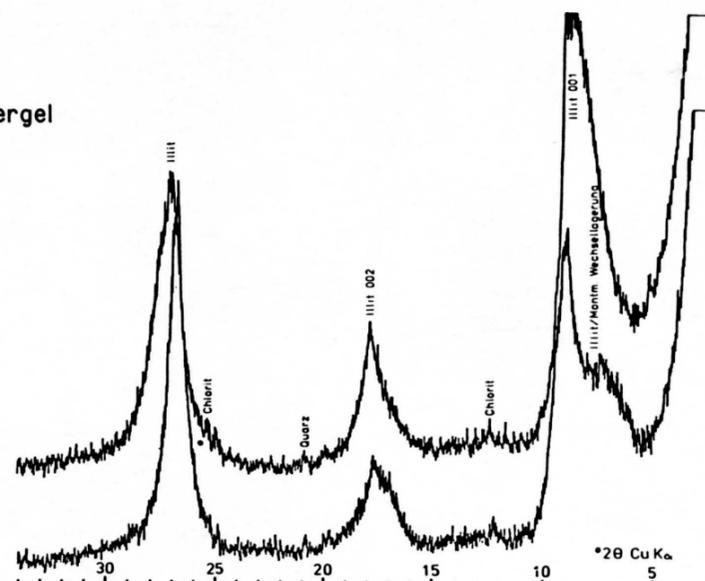


Obere bunte Mergel

104.95 - 105.05

Lufttrocken Ca²⁺

Aethylenglykol

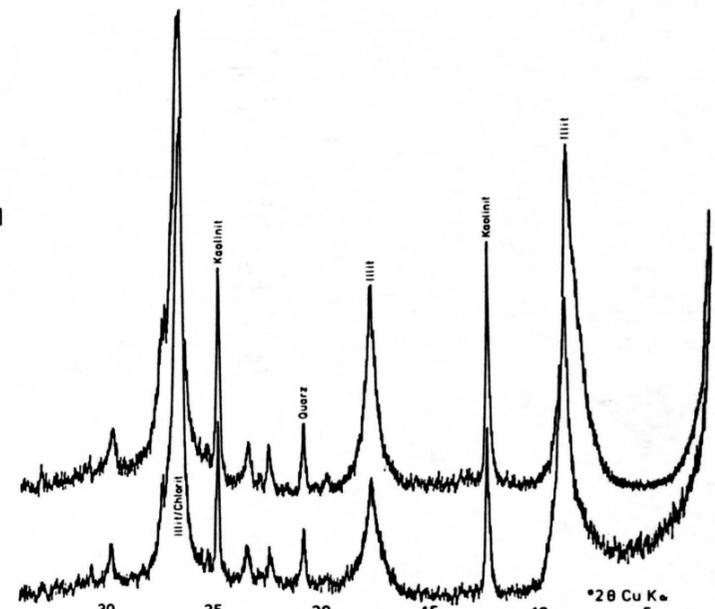


Lettenkohle

219.74 - 219.81

Lufttrocken Ca²⁺

Aethylenglykol

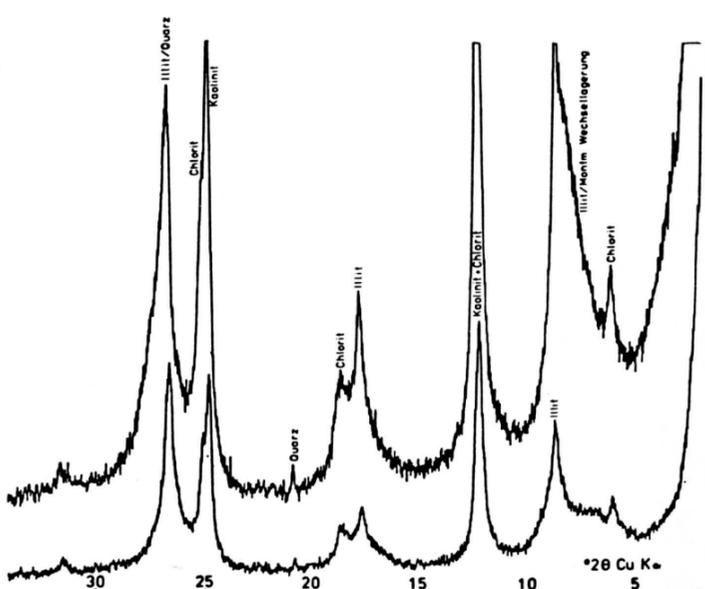


Obtusus - Tone

82.99 - 83.14

Lufttrocken Ca²⁺

Aethylenglykol



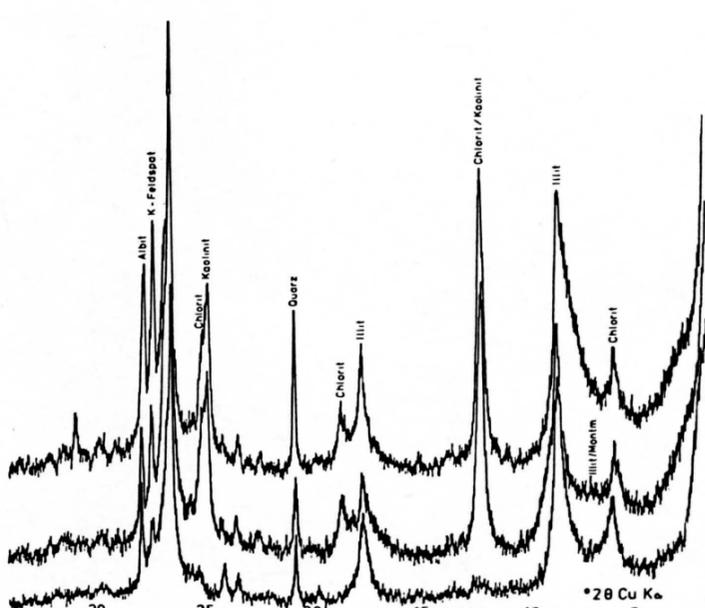
Schilfsandstein

116.40 - 116.50

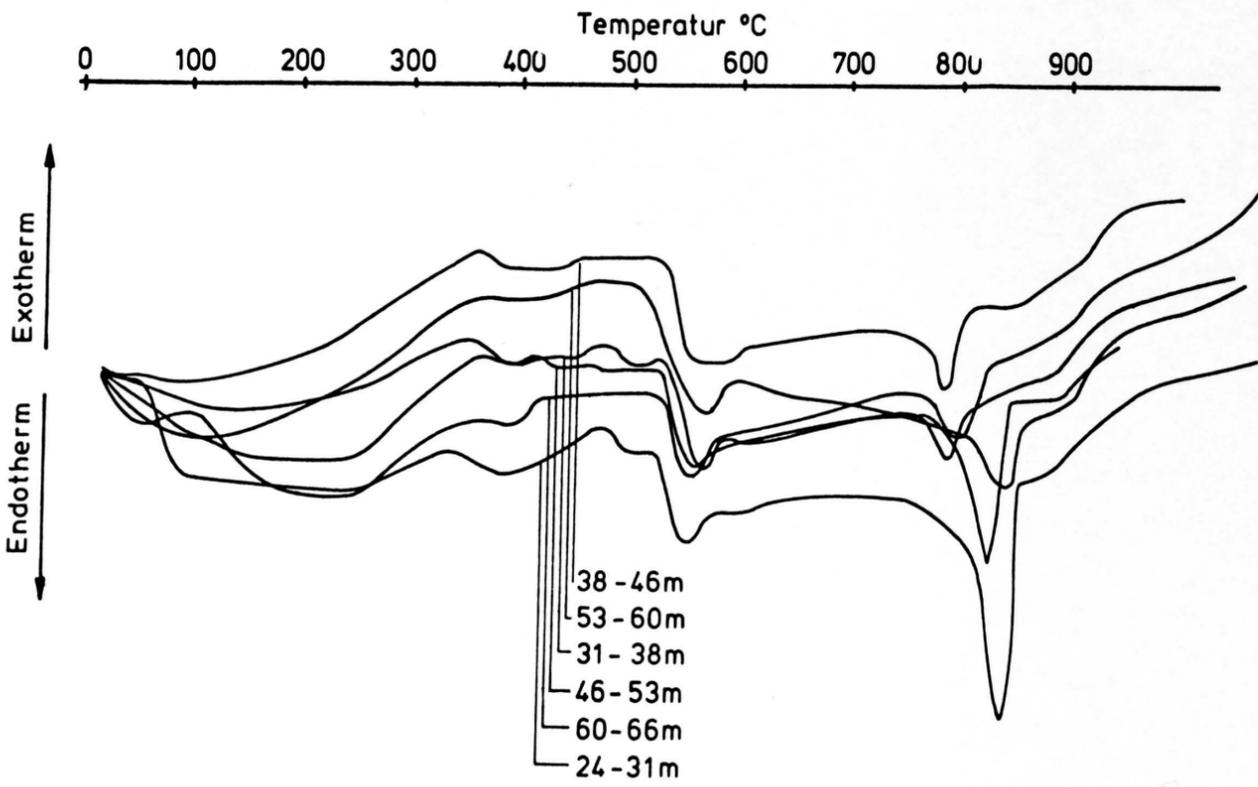
Lufttrocken Ca²⁺

Aethylenglykol

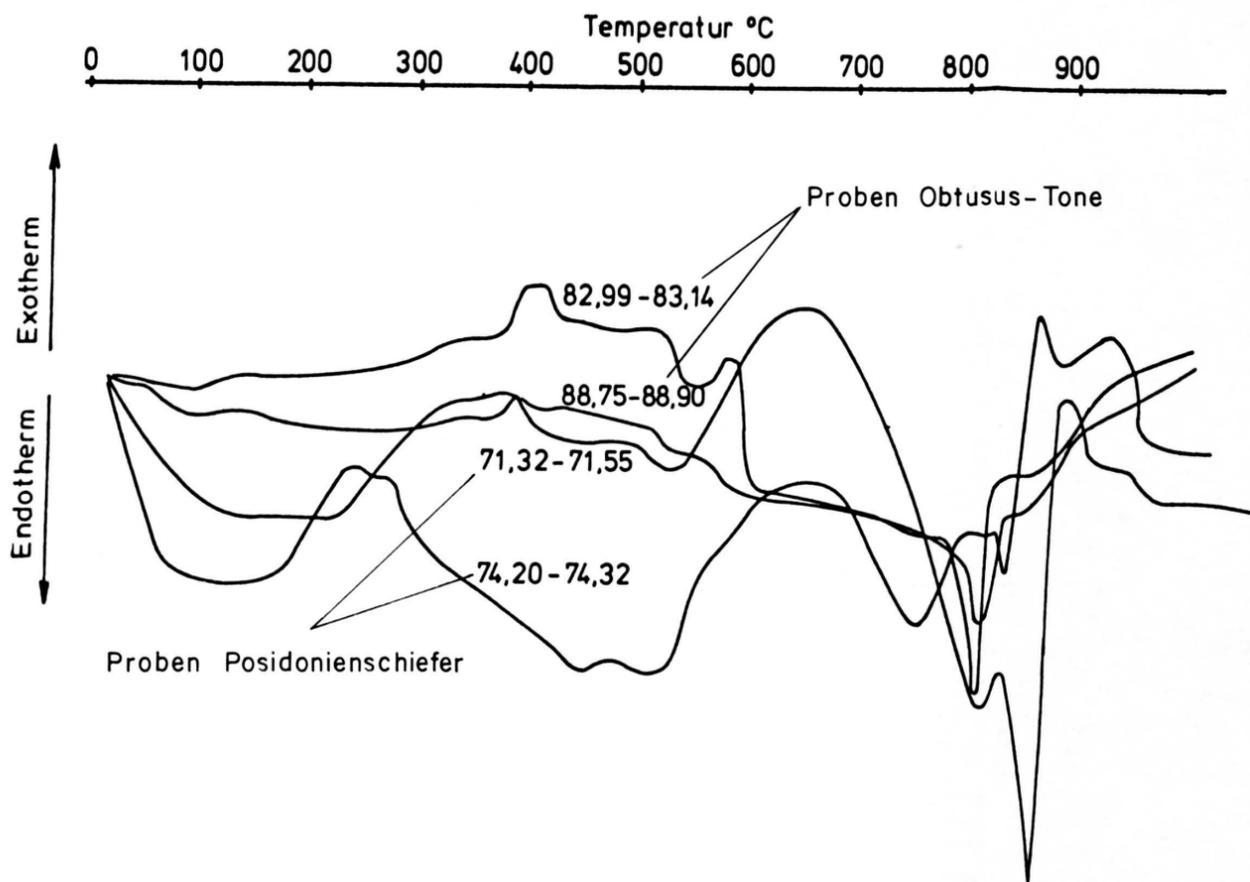
550 ° C



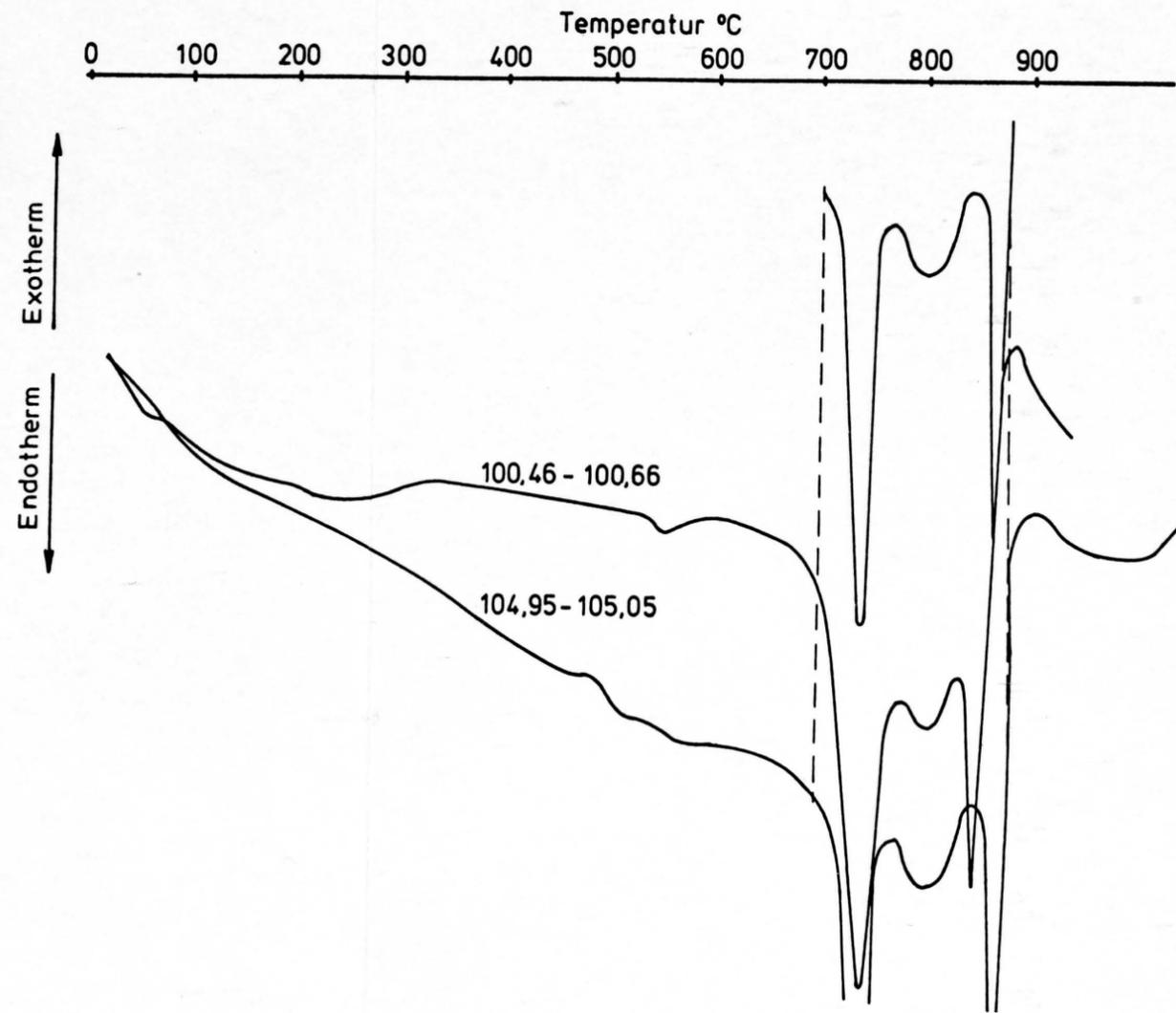
5a



5b

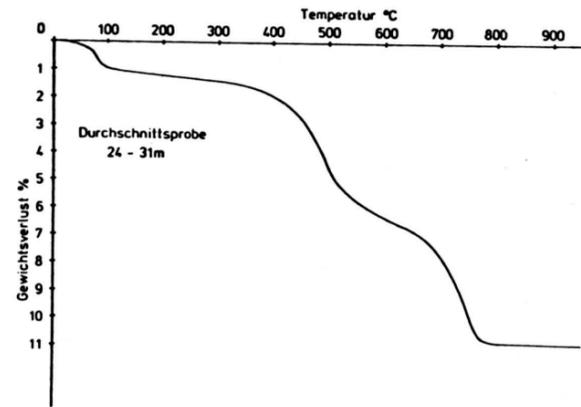


5c

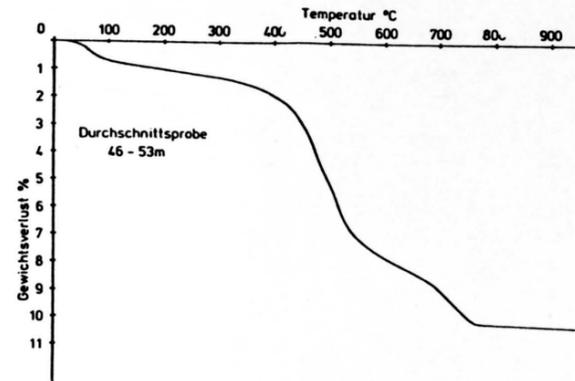


Opalinus - Ton

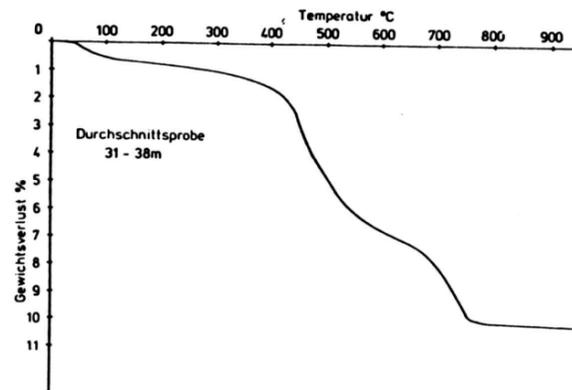
Durchschnittsprobe 24 - 31 m



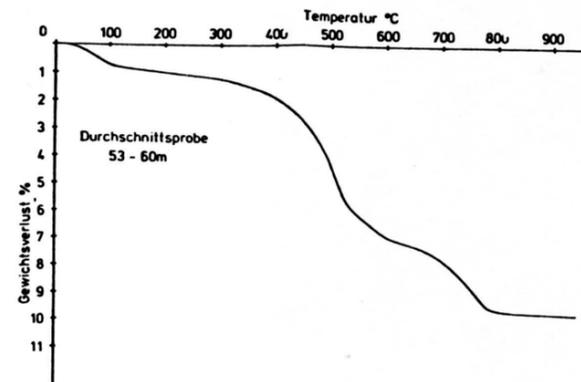
Durchschnittsprobe 46 - 53 m



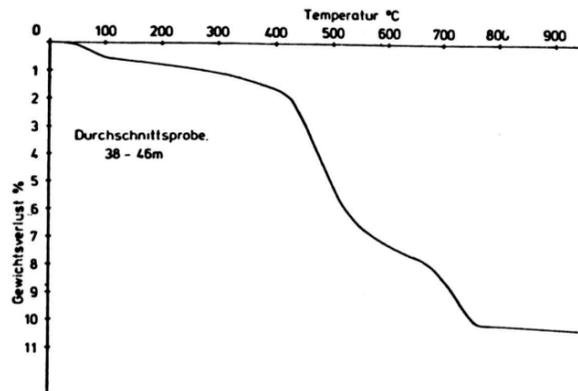
Durchschnittsprobe 31 - 38 m



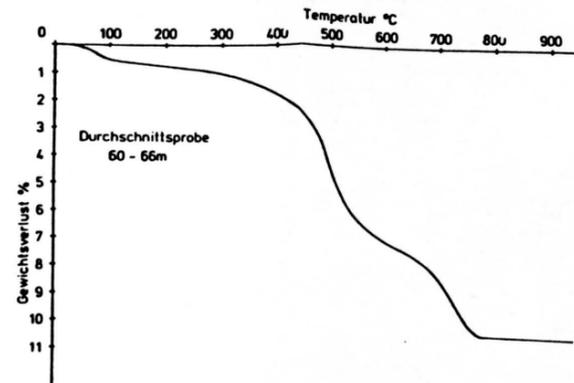
Durchschnittsprobe 53 - 60 m



Durchschnittsprobe 38 - 46 m

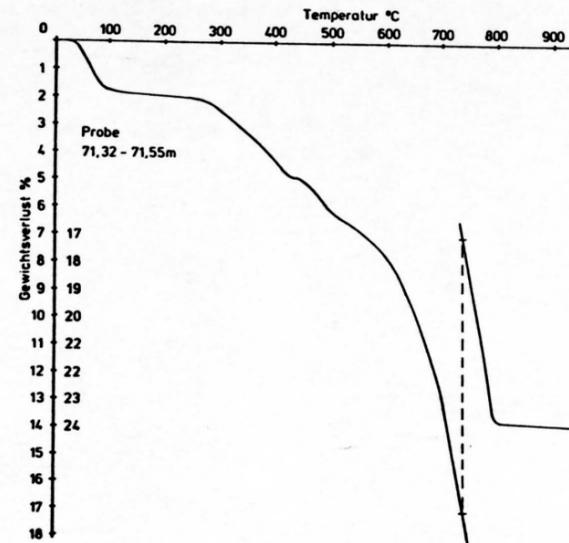


Durchschnittsprobe 60 - 66 m



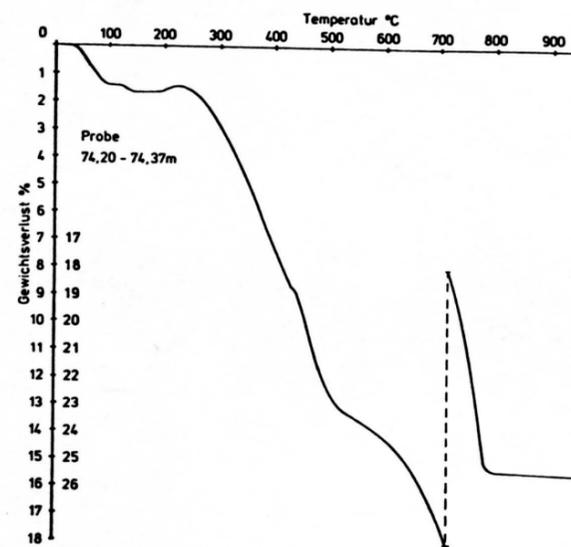
Posidonienschiefer

Probe 71.32 - 71.55 m



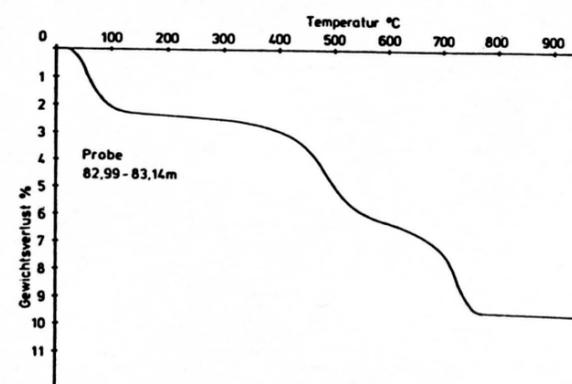
Posidonienschiefer

Probe 74.20 - 74.37 m



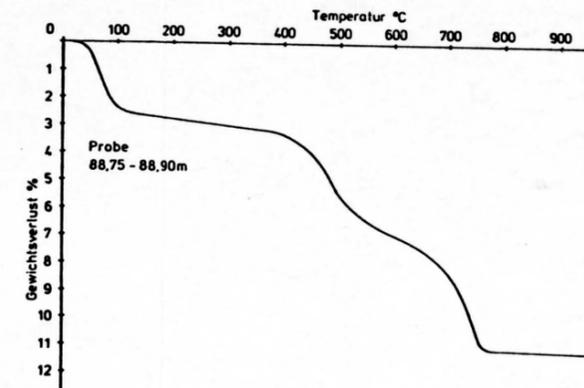
Obtusus - Tone

Probe 82.99 - 83.14 m



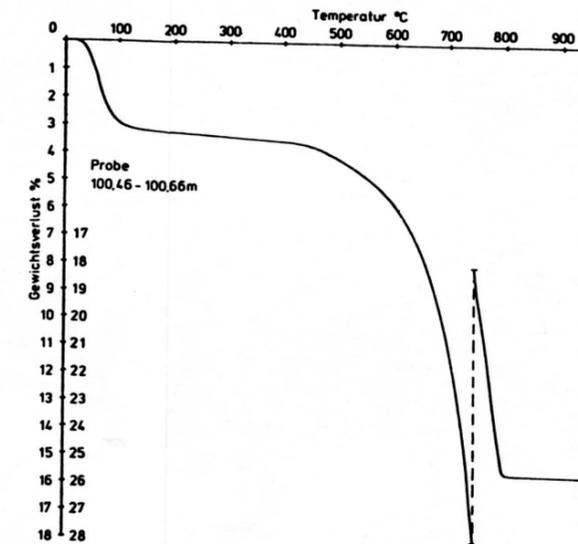
Obtusus - Tone

Probe 88.75 - 88.90 m



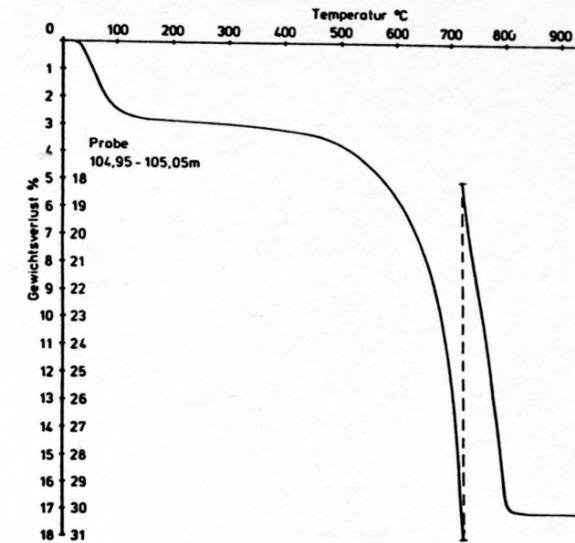
Obere bunte Mergel

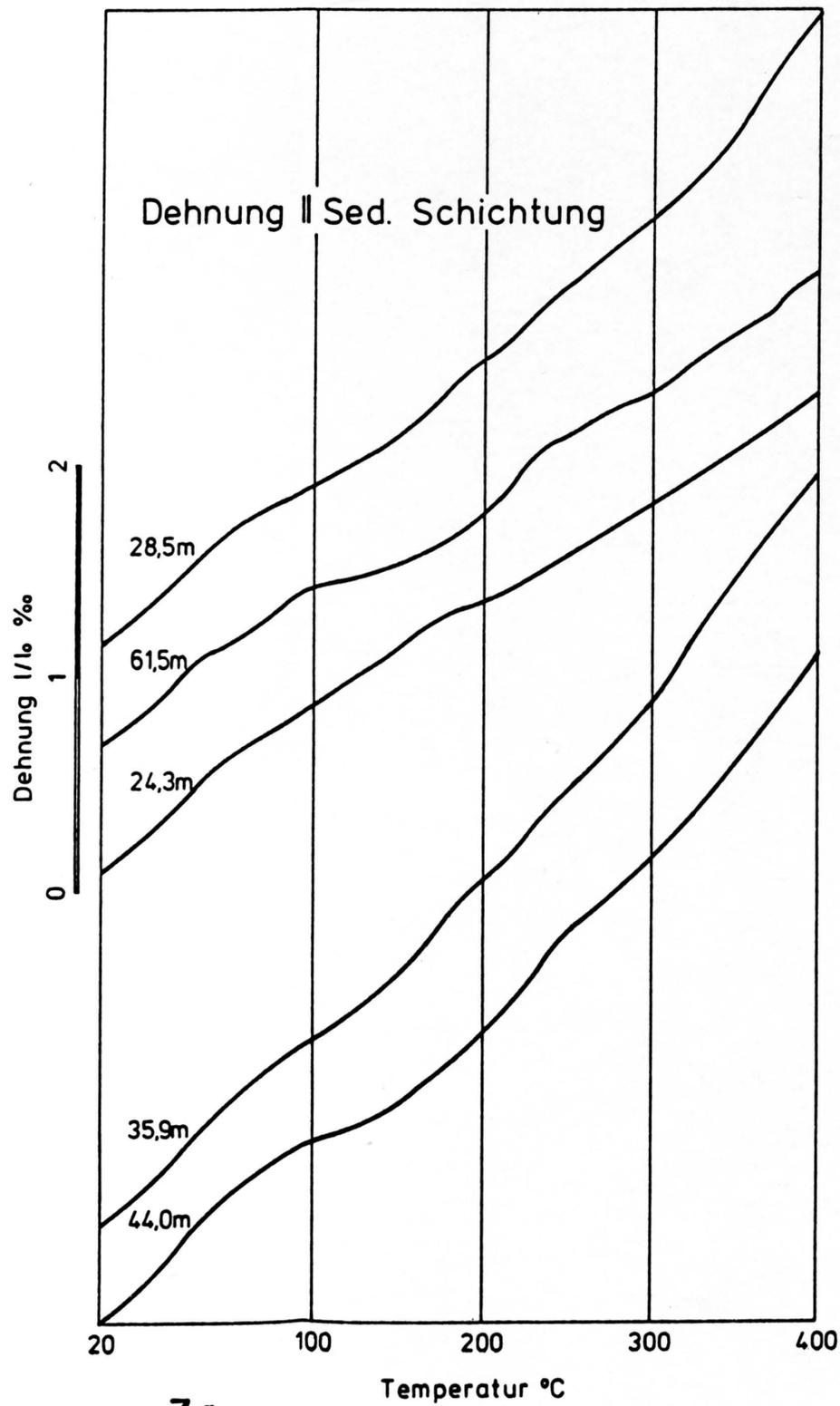
Probe 100.46 - 100.66 m



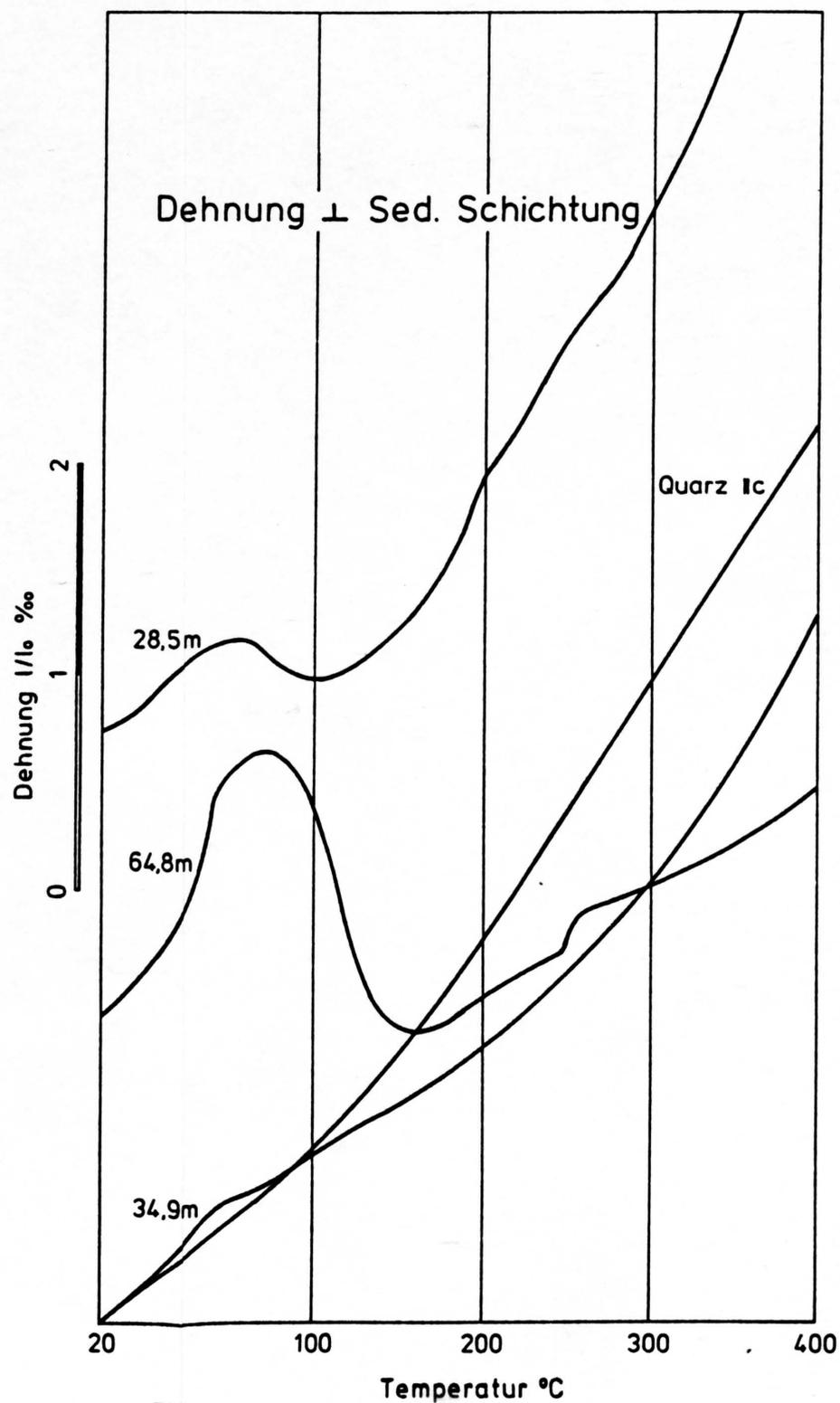
Obere bunte Mergel

Probe 104.95 - 105.05

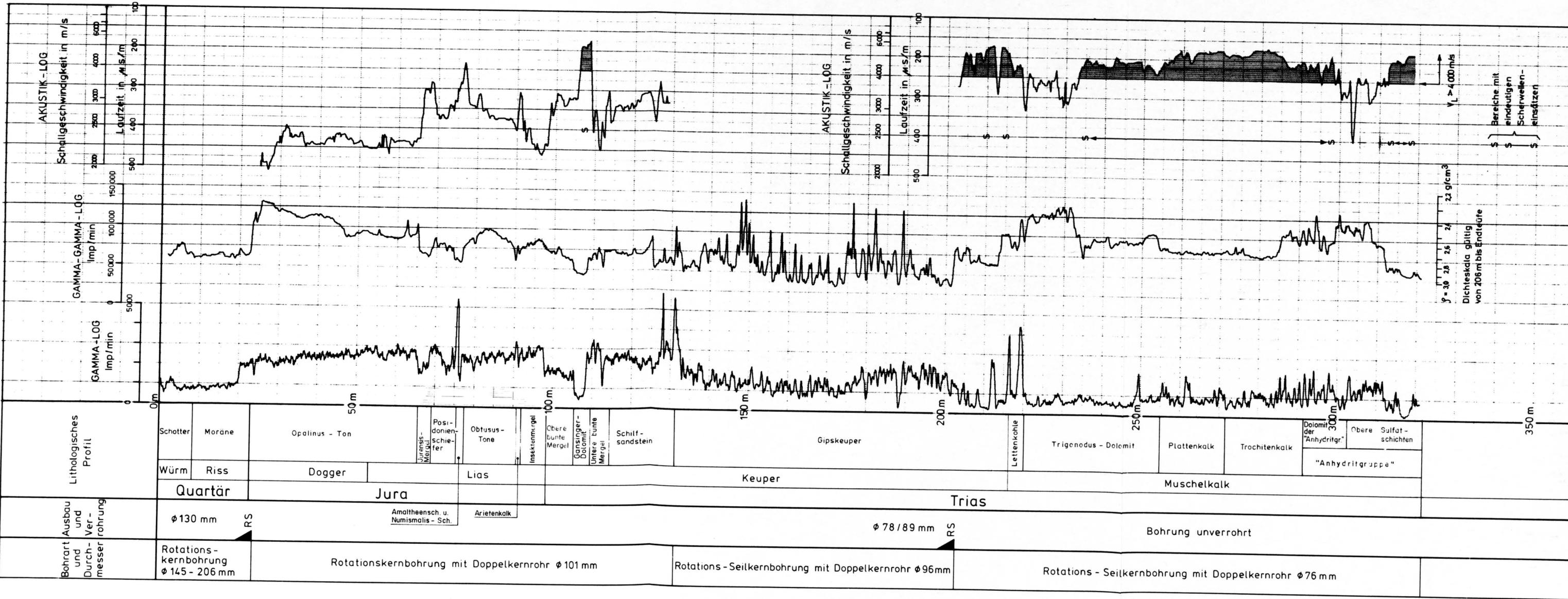




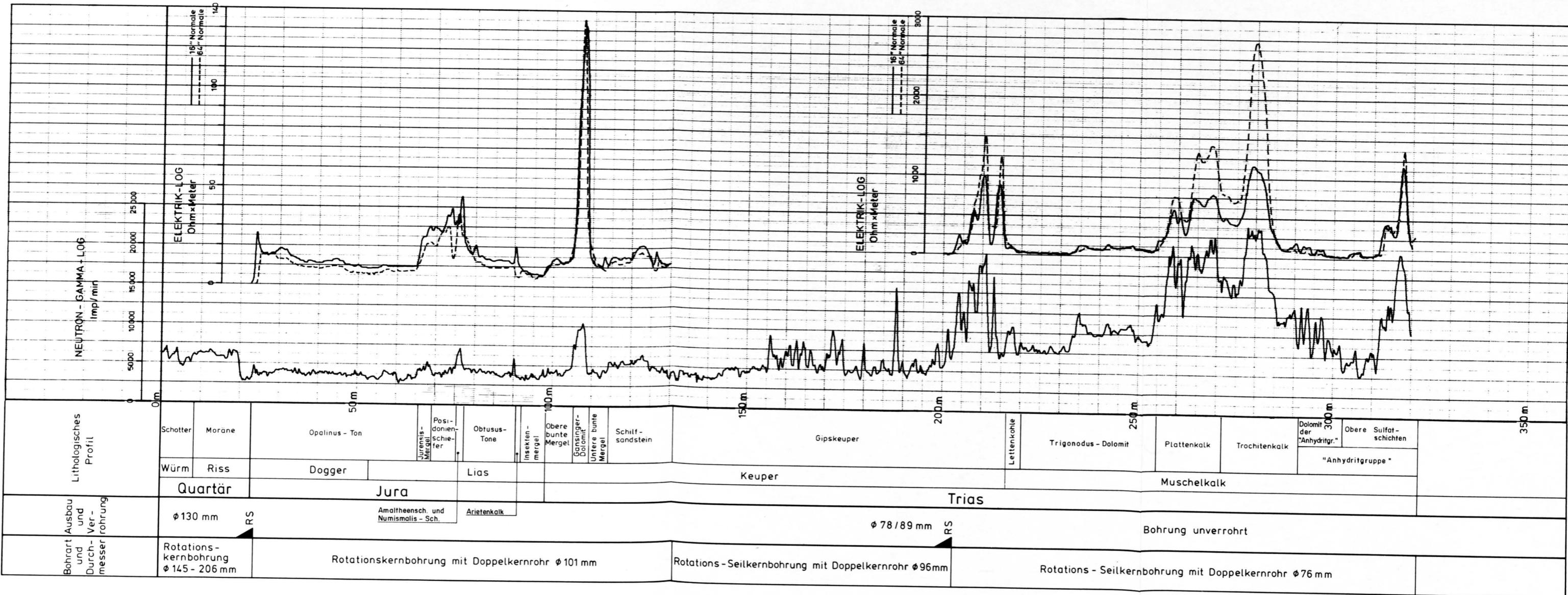
7 a



7 b



Masstab 1:1000 (Messungen durch Prakla-Seismos)

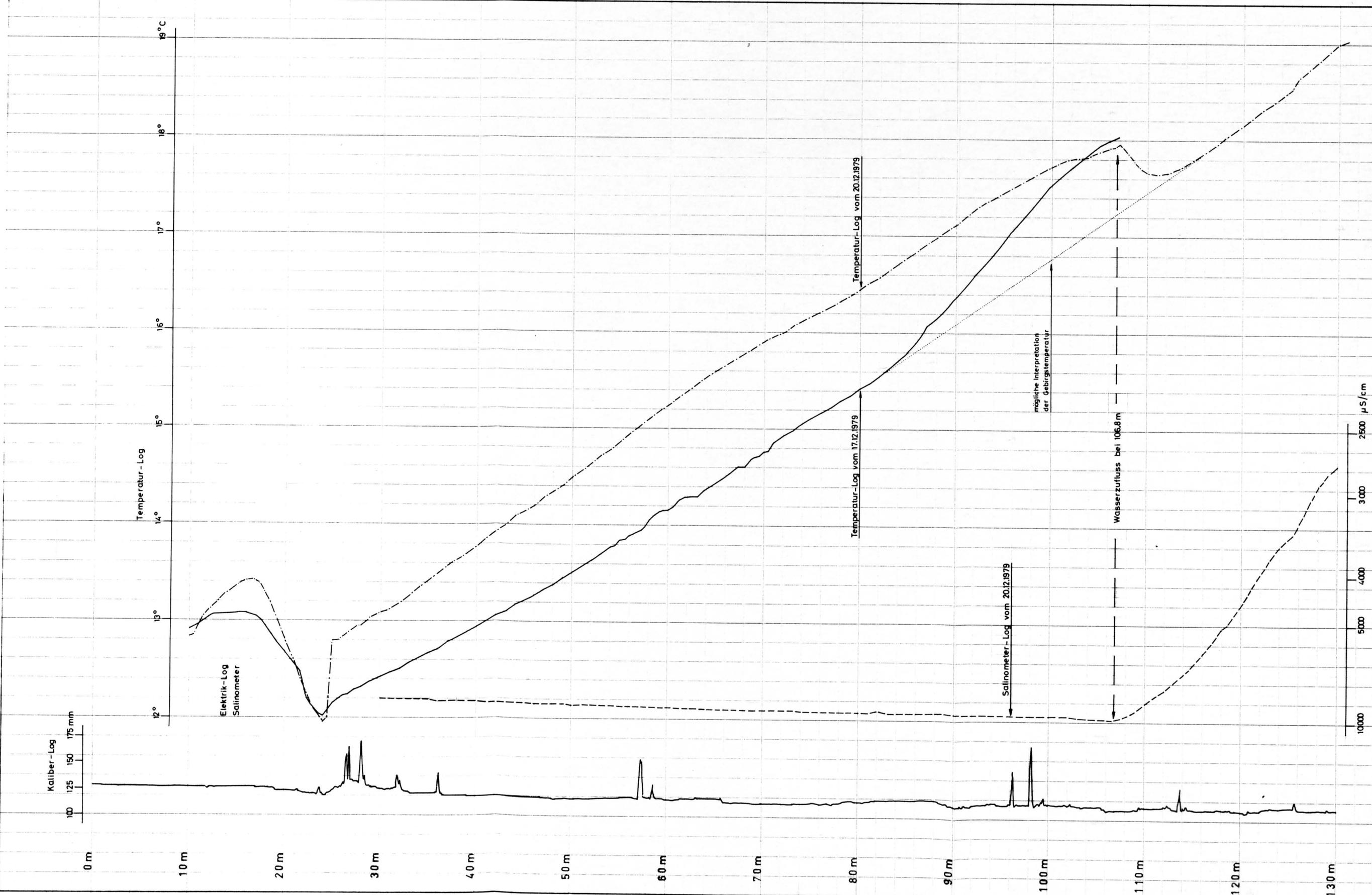


Masstab 1: 1000 (Messungen durch Prakla - Seismos)

NB:

Neutron - Gamma - Log: 0 - 203 m (innerhalb der Verrohrung)
 203 - 321 m (im unverrohrten Bohrloch)
 Elektrik - Log: 25 - 130 m (im unverrohrten Bohrloch)
 200 - 321 m (im unverrohrten Bohrloch)

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ GEOTECHNISCHE SERIE Lieferung 66	Nagra Cédra Cisra Technischer Bericht NTB 84-34
VERGLEICHENDE DARSTELLUNG VON NEUTRON-GAMMA-LOG UND ELEKTRIK-LOG 16"- UND 64"-NORMALE	
Kernbohrung Beznau	BEILAGE 12

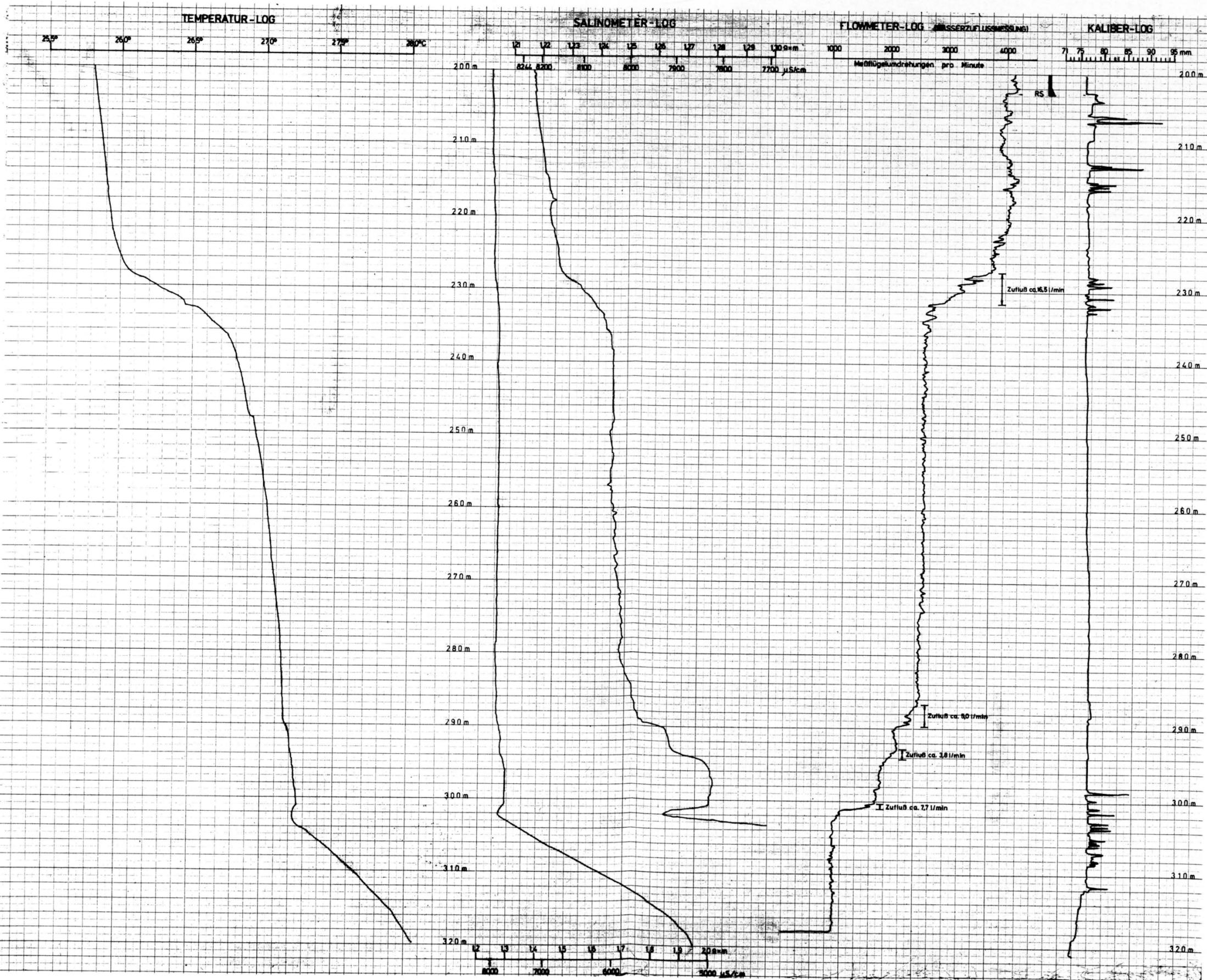


Masstab 1:400 (Messungen durch Prakla - Seismos)

Aus dem Salinometer-Log lassen sich folgende Leitfähigkeitswerte für die ruhende Wassersäule im Bohrloch ableiten:

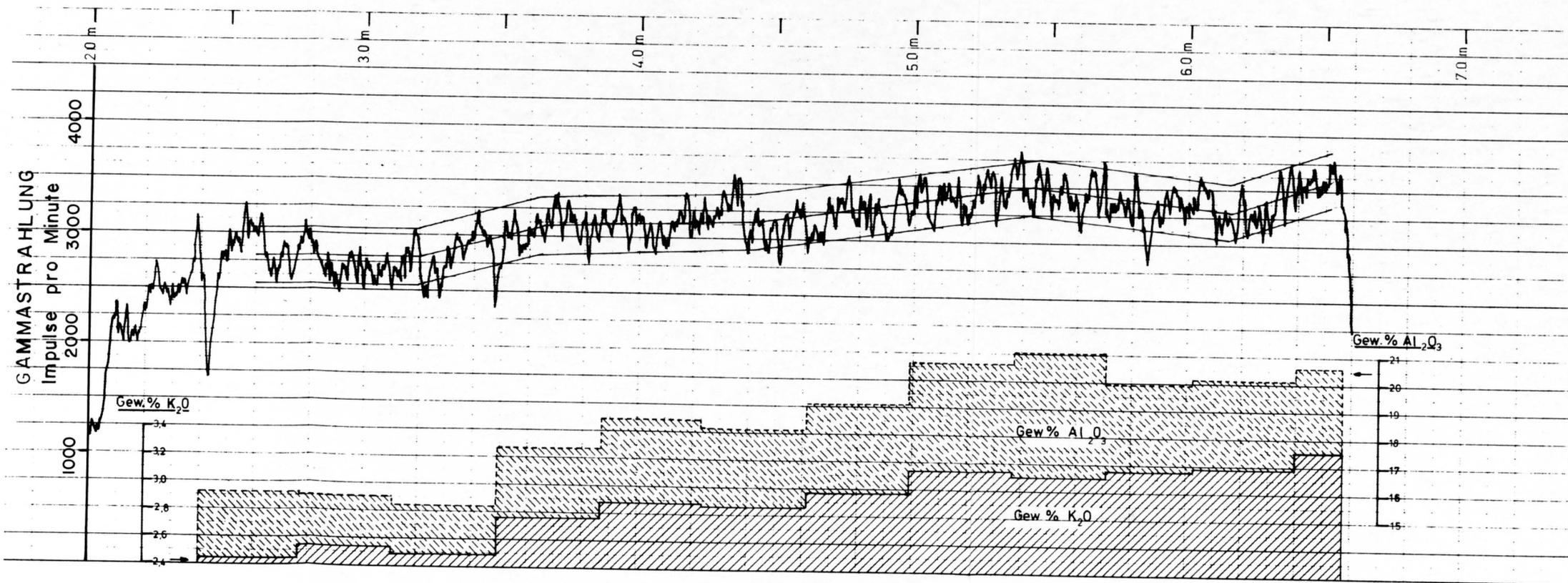
Tiefe (m)	Leitfähigkeit ($\mu\text{S/cm}$)
30.00	8 264
100.00	9 434
106.80	9 709
130.00	2 732

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ GEOTECHNISCHE SERIE Lieferung 66	Nagra Cédra Cibra Technischer Bericht NTB 84-34
WASSERZUFLUSS BEI 106,80 M TIEFE	
Kernbohrung Beznau	BEILAGE 13



Aus den Salinometer - Logs lassen sich folgende Leitfähigkeitswerte für die aufsteigenden Muschelkalkwässer bzw. die ruhende Wassersäule ableiten :

Tiefe (m)	Leitfähigkeit (µS/cm)
220	8 177
240	8 035
280	8 012
291	7 902
300	7 815
321	5 089



Masstab 1: 200 (Messung durch Prakla - Seismos)

Bemerkungen:

Registrierung im unverrohrten Bohrloch im Bereich des Opalinus-Tons mit Darstellung des möglichen mittleren statistischen Fehlers sowie der Gewichtsprozent für Al_2O_3 und K_2O .

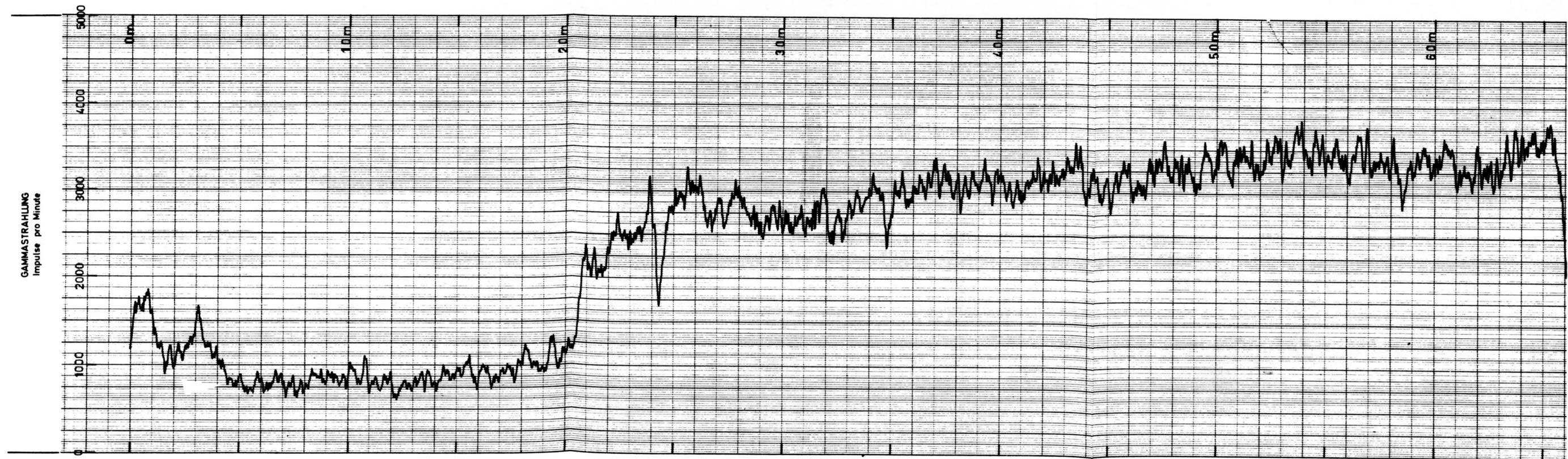
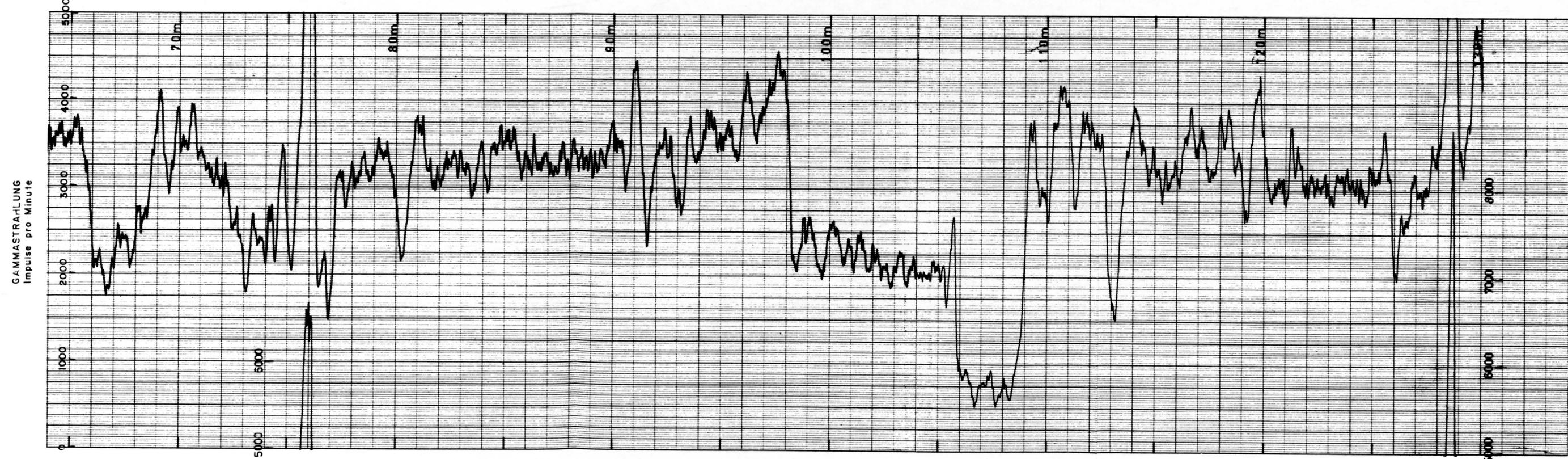
BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ
GEOTECHNISCHE SERIE
Lieferung 66

Nagra Cédra Cisra
Technischer Bericht NTB 84-34

GAMMA-LOG, 20-66 m

Kernbohrung Beznau

BEILAGE 15



Masstab 1 : 200

(Messungen durch Prakla - Seismos)

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ
GEOTECHNISCHE SERIE
Lieferung 66

Nagra Cédra Cisra
Technischer Bericht NTB 84-34

GAMMA-LOG, GEMESSEN IM UNVERROHRTEM BOHRLOCH,
0-130 m

Kernbohrung Beznau

BEILAGE 16