

Der Mittlere Muschelkalk in Bohrungen Norddeutschlands: Fazies, Geochemie, Zyklo- und Sequenzstratigraphie

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

der Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
(mathematisch-naturwissenschaftlicher Bereich)
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

vorgelegt von

Simone Röhling

Halle/Saale
2000

urn:nbn:de:gbv:3-000003795

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=nbn%3Ade%3Agbv%3A3-000003795>]

Der Mittlere Muschelkalk in Bohrungen Norddeutschlands: Fazies, Geochemie, Zyklo- und Sequenzstratigraphie

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

vorgelegt der

der Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
(mathematisch-naturwissenschaftlicher Bereich)
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

von

Simone Röhling

geb. am: 05.01.1964 in Potsdam

Gutachterin bzw. Gutachter:

1. Prof. Dr. G. H. Bachmann
2. Prof. Dr. J. Winsemann
3. Prof. Dr. J. Szulc

Datum der Verteidigung: 05.07.2002

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

TABELLENVERZEICHNIS

VERZEICHNIS DER TAFELN

ANLAGENVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG.....	9
1 EINLEITUNG.....	11
2 GEOLOGISCHER RAHMEN.....	12
2.1 Paläogeographie	12
2.2 Lithostratigraphie	14
3 UNTERSUCHUNGSMETHODIK UND DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN	16
3.1 Datenmaterial	16
3.1.1 Bohrdaten.....	16
3.1.2 Kernmaterial	16
3.2 Geophysikalische Untersuchungen	16
3.2.1 Gamma-Ray-Messungen im Bohrloch	18
3.2.2 Gamma-Ray-Messungen an Bohrkernen.....	20
3.2.3 Sonic-Messungen.....	20
3.3 Korrelationen.....	21
3.4 Geochemische Analyse	22
3.4.1 Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	22
3.4.2 Optische Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)	23
3.4.3 Röntgendiffraktometrie.....	23
3.5 Halbquantitative Bestimmung des Mineralbestands	24
3.6 Statistische Auswertung des Datenmaterials.....	26
3.7 Mikrofazies.....	27
3.8 Palynologie	27
4 LITHOSTRATIGRAPHIE UND REGIONALE DIFFERENZIERUNG	29
4.1 Grenzbereich Unterer/Mittlerer Muschelkalk	29
4.2 Mittlerer Muschelkalk	31
4.3 Grenzbereich Mittlerer/Oberer Muschelkalk	32
4.4 Oberer Muschelkalk	35
4.5 Logstratigraphie.....	35
5 DAS REFERENZPROFIL FÜR DEN MITTLEREN MUSCHELKALK IN NORDDEUTSCHLAND – DIE BOHRUNG REMLINGEN 7	37
5.1 Lage und strukturelle Position der Bohrung Remlingen 7	37
5.2 Kernmaterial der Bohrung Remlingen 7	39
5.3 Gammastrahlungsmessungen an den Bohrkernen der Bohrung Remlingen 7	41

5.4	Lithologie und Logbild des Mittleren Muschelkalks in der Bohrung Remlingen 7.....	44
5.4.1	Das Liegende des Mittleren Muschelkalks (Abb. 14, Anl. 4, Taf. 31-34).....	44
5.4.2	Karlstadt-Formation (Abb. 14, Anl. 4, Taf. 29-31)	44
5.4.3	Heilbronn-Formation (Abb. 14, Anl. 1 -10, Taf. 29 - 4).....	47
5.4.4	Diemel-Formation (Abb. 14, Anl.7, Taf. 4-2)	52
5.4.5	Das Hangende des Mittleren Muschelkalks (Abb. 14, Anl. 1, Taf. 2-1)	53
5.5	Mikrofazies des Mittleren Muschelkalks in der Bohrung Remlingen 7.....	53
5.5.1	Calcifazies	53
5.5.1.1	Mikrite (Mudstone)	54
5.5.1.2	Calcsiltitlaminit (Taf.35/4).....	54
5.5.1.3	Oobiosparit (Grainstone).....	54
5.5.1.4	Oobiomikrit (Wackestone, Taf. 35/1, 35/5)	55
5.5.1.5	Biopelsparit (Grainstone)	55
5.5.2	Dolomitfazies.....	56
5.5.2.1	Dolomikrit (Mudstone, Taf. 36/6).....	56
5.5.2.2	Dolomikrosparit/Dolosparit (Mudstone, Taf. 35/7, 35/8, 35/9, 36/2)	56
5.5.2.3	Algenlaminit (Bindstone, Taf. 35/2, 35/3)	57
5.5.2.4	Dolosiltitlaminit (Taf. 35/2, 35/6)	57
5.5.2.5	Dolopelmikrit bis Dolobiopelmikrit (Wackestone, Taf. 36/8)	57
5.5.3	Anhydritfazies.....	57
5.5.3.1	Feinkristalliner Anhydrit (Taf. 36/4)	58
5.5.3.2	Dolomit-Anhydrit-Rhythmit	58
5.5.3.3	Anhydritlaminit (Taf. 36/3, 36/5, 36/9, 36/10).....	59
5.5.3.4	Massiver Anhydrit (Taf. 36/7)	59
5.5.4	Mergelfazies	59
5.5.5	Lithofazies des Steinsalzes	60
5.6	Palynologische Untersuchungen	62
5.7	Geochemische Untersuchungen	67
5.7.1	Elementverteilungen	68
5.7.2	Geochemie der Karbonate	75
5.7.2.1	Gesamtkarbonatgehalt und karbonatmineralogische Zusammensetzung.....	75
5.7.2.2	Zur Stöchiometrie des Dolomits	76
5.7.3	Spurenelementverteilungen in den Karbonaten	78
5.7.3.1	Strontium.....	78
5.7.3.2	Eisen und Mangan.....	79
5.7.3.3	Natrium	80
5.7.4	Geochemie der Evaporite.....	81
5.7.4.1	Strontium.....	81
5.7.4.2	Brom in den Haliten	82
5.7.5	Clusteranalyse des Mittleren Muschelkalks.....	83
5.7.6	Stratigraphisch-geochemische Korrelation	86
5.7.6.1	Die Grenze Unterer/Mittlerer Muschelkalk	86

5.7.6.2	Mittlerer Muschelkalk	86
5.7.6.3	Grenze Mittlerer/Oberer Muschelkalk	89
5.8	Faziesinterpretation und Ablagerungsräume	90
6	DER MITTLERE MUSCHELKALK IN DEN BOHRUNGEN NORDDEUTSCH-LANDS	93
6.1	Regionalgeologische Gliederung des mitteltriassischen Norddeutschen Beckens	93
6.2	Unter- und Obergrenze des Mittleren Muschelkalks in geophysikalischen Bohrlochmessungen des Norddeutschen Beckens	100
6.2.1	Die Grenze Unterer/Mittlerer Muschelkalk	100
6.2.2	Die Grenze Mittlerer/Oberer Muschelkalk	100
6.3	Regionale Korrelation der Zyklizität.....	103
6.4	Die Standardprofile für den Mittleren Muschelkalk des Norddeutschen Beckens ...	103
6.4.1	Westliches Norddeutsches Becken	104
6.4.1.1	Ostfriesland-Region	104
6.4.1.2	Ostfriesland-Region, Sonderentwicklung Norderney-Westdorf-Scholle	107
6.4.1.3	Nördliche Weser-Ems-Region	111
6.4.1.4	Südliche Weser-Ems-Region	113
6.4.2	Zentrales Norddeutsches Becken.....	115
6.4.2.1	Westliche Weser-Elbe-Region	115
6.4.2.2	Östliche Weser-Elbe-Region.....	118
6.4.2.3	Südliche Weser-Elbe-Region	120
6.4.3	Östliches Norddeutsches Becken.....	122
6.4.4	Nördliches Norddeutsches Becken	124
6.5	Log-Korrelationsketten für den Mittleren Muschelkalk des Norddeutschen Beckens.....	126
6.5.1	Der Mittlere Muschelkalk in der Korrelationskette 1-1 [‘] : Randzelgat Z1 - Remlingen 5 (Abb. 6, Anl. 7)	126
6.5.2	Der Mittlere Muschelkalk in der Korrelationskette 2-2 [‘] : Worth Z1 - Gramzow Z1 (Abb. 6, Anl. 8).....	129
6.5.3	Der Mittlere Muschelkalk in der Korrelationskette 3-3 [‘] : Hemmendorf Z1 - Fürstenwalde 3 (Abb. 6, Anl. 9)	130
6.5.4	Der Mittlere Muschelkalk in der Korrelationskette 4-4 [‘] : Kassebruch T2 - Fürstenau Z1 (Abb. 6, Anl. 10).....	132
6.5.5	Der Mittlere Muschelkalk in der Korrelationskette 5-5 [‘] : Bevern Z1 - Siedenburg Z7 (Abb. 6, Anl. 11).....	134
6.5.6	Der Mittlere Muschelkalk in der Korrelationskette 6-6 [‘] : Grevesmühlen 1/87 - Remlingen 5 (Abb. 6, Anl. 12)	135
6.6	Stratigraphisches Konzept für den Mittleren Muschelkalk Norddeutschlands	137
6.7	Parallelisierung regionaler Gliederungen des Mittleren Muschelkalks im Norddeutschen Becken	138
6.8	Korrelation des Mittleren Muschelkalks Norddeutschlands mit dem Mittleren Muschelkalk Süddeutschlands.....	146

7	PALÄOGEOGRAPHISCHE REKONSTRUKTION DES NORDDEUTSCHEN BECKENS ZUR ZEIT DES MITTLEREN MUSCHELKALKS	149
8	ZYKLIZITÄT UND SEQUENZANALYSE	154
8.1	Sedimentationszyklen	154
8.2	Sequenzstratigraphie	159
8.2.1	Terminologie	159
8.2.2	Sequenzstratigraphisches Konzept	161
DANK	167	
LITERATURVERZEICHNIS	167	
ANHANG	185	
TAFELN	199	

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1:	Sequenzstratigraphisches Konzept für den Muschelkalk des Mitteleuropäischen Beckens nach AIGNER & BACHMANN (1992), Zeitskala nach MENNING (1995)	11
Abb. 2:	Paläogeographie der Mitteltrias (Anis-Ladin; leicht verändert nach ZIEGLER 1990)	13
Abb. 3:	Bearbeitete Bohrungen innerhalb des Sockelstörungsmusters von Norddeutschland (nach BALDSCHUHN & KOCKEL 1997)	17
Abb. 4:	Gammastrahlungsmessungen verschiedener Sedimente (BRADEL 1985)	19
Abb. 5:	Messprinzip der Heger-Sonde zur Bestimmung der natürlichen Radioaktivität an Bohrkernen	19
Abb. 6:	Korrelationsprofile innerhalb des Norddeutschen Beckens	21
Abb. 7:	Berechnung der Hauptmineralzusammensetzung	24
Abb. 8:	Tektonische Strukturen im nördlichen Harzvorland (nach BALDSCHUHN et al. 1999)	34
Abb. 9:	Geologisches Profil der Struktur Asse (KOCKEL 1983)	38
Abb. 10:	Geologischer Querschnitt durch die Salzstruktur Asse mit der Bohrung Remlingen 7 (nach KLARR et al. 1990)	35
Abb. 11:	Typischer Zyklus des Mittleren Muschelkalks am Beispiel des Zyklus 5 der Bohrung Remlingen 7	40
Abb. 12:	Gegenüberstellung der Gamma-Ray-Logs der Bohrkernvermessung („Heger“-Kurve, Gleitfaktor 10) und der geophysikalischen Bohrlochvermessung („Schlumberger“-Kurve) der Bohrung Remlingen 7	43
Abb. 13:	Gegenüberstellung von mit unterschiedlichen Faktoren geglätteten Gamma-Ray-Logs der Kernvermessung der Bohrung Remlingen 7	43
Abb. 14:	Gamma-Ray-Log der Bohrkernvermessung und Sonic-Log der Bohrung Remlingen 7, markante Spitzen im Gamma-Ray- und Sonic-Log (G*, S*) wurden unter Einbeziehung der Lithologie (A: Anhydrit, M: Mergelstein, D: Dolomit, T: Tonstein) hervorgehoben	46
Abb. 15:	Schema der Mikrostrukturen von Anhydritgesteinen (LANGBEIN 1979)	54
Abb. 16:	Primäres Vorkommen und Ablagerungsräume von Palynomorphen des Muschelkalks (HEUNISCH 1990)	62
Abb. 17:	Palynofazies und Einsetzen stratigraphisch bedeutender Palynomorphen-Taxa im Mittleren Muschelkalk der Bohrung Remlingen 7	65
Abb. 18:	Zusammensetzung der Sedimente (ohne Halit) im untersuchten Profil	68
Abb. 19:	Boxplots ausgewählter Elemente - Sedimentgruppen im Vergleich	70
Abb. 20:	Korrelationen ausgewählter Elemente mit dem unlöslichen Rückstand (IR)	72
Abb. 21:	Häufigkeitsverteilung (Histogramme) ausgewählter Elemente, (n = Anzahl der Proben/Fälle, die in eine Kategorie/Intervall gehören)	74
Abb. 22:	Häufigkeitsverteilung des Gesamtkarbonatgehalts	75

Abb. 23: Ca-Gehalte im Dolomit	77
Abb. 24: Die Verteilung der Br-Gehalte im Salz des Mittleren Muschelkalks, ergänzt mit Bestimmungen von REBELLE & STEMPPEL (pers. Mitt.)	82
Abb. 25: Hierarchische Clusteranalyse der Elemente des Mittleren Muschelkalks	83
Abb. 26: Clusterzentrenanalyse der Proben des Mittleren Muschelkalks mit der Vorgabe, vier Cluster zu bilden	84
Abb. 27: Clusterzentrenanalyse der Proben des Mittleren Muschelkalks mit der Vorgabe, drei Cluster zu bilden	85
Abb. 28: Boxplot der Elemente - Karlstadt- (mmK), Heilbronn- (mmH) und Diemel-Formation (mmD) im Vergleich.....	87
Abb. 29: Das Ca/Mg-Verhältnis in den untersuchten Sedimenten.....	89
Abb. 30: Regionalgeologische Einheiten des Norddeutschen Beckens unter Berücksichtigung der lithologischen und faziellen Entwicklung des Mittleren Muschelkalkes	
Abb. 31: Paläogeographische Mächtigkeiten des Muschelkalks im Norddeutschen Becken, verändert nach BEUTLER (1993) und GAERTNER (1993).....	97
Abb. 32: Restmächtigkeiten des Mittleren Muschelkalks im Norddeutschen Becken, verändert und ergänzt nach GAERTNER & RÖHLING (1993)	99
Abb. 33: Lage der Standardprofile des Mittleren Muschelkalks innerhalb des Sockelstörungsmuster von Norddeutschland (nach Balschuhn & Kockel (1997), Krull (unveröff.), Abkürzungen der Bohrungen siehe Tabelle 16	101
Abb. 34: Geologischer Schnitt von der Salzstruktur Westerems bis zum Salzstock Emshörn (nach FRISCH 1989).....	104
Abb. 35: Standardprofil des Mittleren Muschelkalks der Ostfriesland-Region - Bohrung Randzelgat Z1	105
Abb. 36: Geologischer Schnitt durch den Westdorf-Graben (nach KOCKEL 1995)	107
Abb. 37: Standardprofil des Mittleren Muschelkalks der Ostfriesland-Region, Sonderentwicklung Norderney-Westdorf-Scholle – Bohrung Westdorf 2A	109
Abb. 38: Korrelation des Mittleren Muschelkalks der Bohrung Westdorf 2A mit der Bohrung Norderney Z1	110
Abb. 39: Geologischer Schnitt durch die Struktur Delmenhorst (nach Baldschuhn et al. 1996)	111
Abb. 40: Standardprofil für den Mittleren Muschelkalk der nördlichen Weser-Ems-Region – Bohrung Ganderkesee Z1	112
Abb. 41: Geologischer Schnitt durch den Neuenkirchener Sattel (nach FRISCH 1985)	114
Abb. 42: Standardprofil des Mittleren Muschelkalks der südlichen Weser-Ems-Region – Bohrung Fürstenau Z1	1145
Abb. 43: Geologischer Schnitt durch die Struktur Hodenhagen (nach BALDSCHUHN 1985).....	116
Abb. 44: Standardprofil des Mittleren Muschelkalks der südlichen Weser-Ems-Region – Bohrung Krusenhausen Z1	117
Abb. 45: Geologischer Schnitt durch die Wendland-Nordaltmark-Scholle (nach BALDSCHUHN et al. 1996).....	118
Abb. 46: Standardprofil des Mittleren Muschelkalks der östlichen Weser-Elbe-Region – Bohrung Volzendorf Z1	119
Abb. 47: Geologischer Schnitt durch die Hils-Scholle (nach BALDSCHUHN et al. 1996). Der im geologischen Schmitt erkennbare Zechstein-Salzkeil liegt stratigraphisch	120
Abb. 48: Standardprofil des Mittleren Muschelkalks der südlichen Weser-Elbe-Region – Bohrung Hemmendorf Z1	121
Abb. 49: Standardprofil des Mittleren Muschelkalks des östlichen Norddeutschen Beckens – Bohrung Fürstenwalde 3	123
Abb. 50: Standardprofil des Mittleren Muschelkalks des nördlichen Norddeutschen Beckens – Bohrung Schwerin 1/87	125
Abb. 51: Kalibermessung der Bohrung Oberg Z1, Bohrlochauskesselungen im Bereich der Steinsalzhorizonte	127
Abb. 52: Der Obere Muschelkalk in den Bohrungen Hemmelte Z4 und Sande Z1	134

Abb. 53: Lithostratigraphische Korrelation der Zyklen des Mittleren Muschelkalks mit den Gliederungen von WOLBURG (1969) und TRUSHEIM (1971) am Beispiel der Bohrung Remels T1.....	139
Abb. 54: Lithostratigraphische Korrelation der Zyklen des Mittleren Muschelkalks der Bohrung Remlingen 5 mit der Bohrung Calvörde 2/62.....	141
Abb. 55: Lithostratigraphische Korrelation des Mittleren Muschelkalks der Bohrung Fürstenwalde 3 und des Profils Rüdersdorf (BEUTLER 1993, ZWENGER 1993)	142
Abb. 56: Korrelation der Zyklen des Mittleren Muschelkalks der Bohrung Braudel Z1 mit den von GAERTNER & RÖHLING (1993) in dieser Bohrung (Raum Wendland) definierten Logzyklen	144
Abb. 57: Korrelation der Zyklen 5 bis 9 des Mittleren Muschelkalks in der Bohrung Braudel Z1 mit den Logzyklen einer Bohrung des Weser-Troges.....	145
Abb. 58: Korrelation der Zyklen des Mittleren Muschelkalks des Norddeutschen Beckens mit dem süddeutschen Muschelkalk – Solebohrung Bad Rappenau (SIMON 1988)	148
Abb. 59: Korrelation des Mittleren Muschelkalks aus dem zentralen Bereich des Westdorf-Grabens (Westdorf 2A) über den SE-Rand (Wurzeldeich Z1) ins Norddeutsche Becken (Sande Z1)	151
Abb. 60: Hierarchisch gegliederte Zyklizität im Mittleren Muschelkalk der Bohrung Remlingen 7 am Beispiel des Zyklus 6, Details s. Anl. 2, Legende s. Anl. 4	155
Abb. 61: Interpretation eines salinaren Kleinzyklus alternativ als Parasequenz oder hochfrequente Sequenz (HFS)	157
Abb. 62: Sequenzstratigraphische Interpretation des Mittleren Muschelkalks in der Bohrung Remlingen 7	162
Abb. 63: Standardprofil des Mittleren Muschelkalks im Norddeutschen Becken mit sequenzstratigraphischer Interpretation.....	164
Abb. 60: Schematisches Ablagerungsmodell für den Mittleren Muschelkalk Norddeutschlands.....	165

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1: Lithologische Aussage von Bohrlogs (nach JANKOWSKY 1983)	18
Tab. 2: Durchschnittliche Radioaktivität ausgewählter Gesteine.....	19
Tab. 3: Schall-Laufzeiten in Gesteinen	21
Tab. 4: Gliederung des Mittleren Muschelkalks in Norddeutschland	33
Tab. 5: Lithologische Gliederung des Mittleren Muschelkalks in der Bohrung Remlingen 7	40
Tab. 6: Palynostratigraphische Gliederungen des Muschelkalks und Verbreitung stratigraphisch wichtiger Palynomorphen-Taxa im Muschelkalk des Mitteleuropäischen Beckens (nach HEUNISCH i. Vorb.)	63
Tab. 7: Charakterisierung der Gesteine des Mittleren Muschelkalks in der Bohrung Remlingen 7	67
Tab. 8: Stratigraphische Gliederung des Mittleren Muschelkalks im Norddeutschen Becken	137
Tab. 9: Idealer Evaporit-Zyklus nach KRUMBEIN & SLOSS (1963).....	154
Tab. 10: Quantitative palynologische Auswertung (nach HEUNISCH 1998)	187
Tab. 11: Quantitative Verteilung der Palynomorphen nach Morpho- und Großgruppen (HEUNISCH 1998).....	189
Tab. 12: Chemismus ausgewählter Hauptelemente und errechnete Mineralzusammensetzung von Proben der Bohrung Remlingen 7	190
Tab. 13: Statistik der Elemente innerhalb des untersuchten Profils der Bohrung Remlingen 7.....	195
Tab. 14: Mittlere Elementgehalte für die bei der Clusterzentrenanalyse berechneten 4 Cluster	196
Tab. 15: Mittlere Elementgehalte für die bei der Clusterzentrenanalyse berechneten 3 Cluster	196
Tab. 16: Bearbeitete Bohrungen	197

VERZEICHNIS DER TAFELN

Taf. 1- 34: Bohrkernfotographie

Taf. 35: Calcit- und Dolomitfazies im Muschelkalk der Bohrung Remlingen 7

Taf. 36: Dolomit- und Anhydritfazies im Mittleren Muschelkalk der Bohrung Remlingen 7

ANLAGENVERZEICHNIS

- Anl. 1: Lithologisches Profil der Bohrung Remlingen 7, Profilmeter 575,76 - 623,84
- Anl. 2: Lithologisches Profil der Bohrung Remlingen 7, Profilmeter 623,84 - 670,24
- Anl. 3: Lithologisches Profil der Bohrung Remlingen 7, Profilmeter 670,24 - 718,99
- Anl. 4: Lithologisches Profil der Bohrung Remlingen 7, Profilmeter 718,99 - 754,16
- Anl. 5: Gehalte der Elemente Si, Ca, Mg, Al, SO₃, Fe, K, Sr, Mn, Na im Mittleren Muschelkalk der Bohrung Remlingen 7
- Anl. 6: Gehalte der Elemente As, Ba, Cr, Sb, Sc, V, Y, Zn, Zr, Rb im Mittleren Muschelkalk der Bohrung Remlingen 7
- Anl. 7: Gamma-Ray und Sonic-Log-Korrelation für den Mittleren Muschelkalk im Norddeutschen Becken, Korrelationskette 1-1' (Randzelgat Z1 - Remlingen 7)
- Anl. 8: Gamma-Ray und Sonic-Log-Korrelation für den Mittleren Muschelkalk im Norddeutschen Becken, Korrelationskette 2-2' (Worth Z1 - Gramzow 2/87)
- Anl. 9: Gamma-Ray und Sonic-Log-Korrelation für den Mittleren Muschelkalk im Norddeutschen Becken, Korrelationskette 3-3' (Hemmendorf Z1 - Fürstenwalde 3)
- Anl. 10: Gamma-Ray und Sonic-Log-Korrelation für den Mittleren Muschelkalk im Norddeutschen Becken, Korrelationskette 4-4' (Kassebruch T2 - Fürstenau Z1)
- Anl. 11: Gamma-Ray und Sonic-Log-Korrelation für den Mittleren Muschelkalk im Norddeutschen Becken, Korrelationskette 5-5' (Bevern Z1 - Siedenburg Z7)
- Anl. 12: Gamma-Ray und Sonic-Log-Korrelation für den Mittleren Muschelkalk im Norddeutschen Becken, Korrelationskette 6-6' (Grevesmühlen 1/78 - Remlingen 7)

ZUSAMMENFASSUNG

Der Mittlere Muschelkalk des Norddeutschen Beckens besteht aus Dolomiten, Mergeln, dolomitischen Kalken, Anhydriten/Gipsen und Steinsalzen. Infolge von Ablaugung fehlen die evaporitischen Anteile heute z. T. großflächig bis in Teufen von 450 m unter Oberfläche. Vollständige, nicht abgeaugte Profile sind nur in Tiefbohrungen und Gruben-Aufschlüssen zu beobachten.

Als Ablagerungsraum wird eine epikontinentale Karbonatplattform mit flachmarinen subtidalen bis inter-/supratidalen niedrig-energetischen Ablagerungsbedingungen angenommen. Ein arides Klima sowie eine periodische Abgeschlossenheit des Sedimentationsraumes begünstigen Salinitäten bis zur Halitübersättigung.

Die Bohrung Remlingen 7 ist eine der wenigen Bohrungen Norddeutschlands, die den Mittleren Muschelkalk einschließlich seiner halitischen Anteile vollständig gekernt hat. Eine auf mikrofaziellen, geochemischen und geophysikalischen Untersuchungen basierende Sequenzanalyse dieser Bohrung führte zu einer lithostratigraphischen Feingliederung und zur Abgrenzung von 9 Zyklen mit transgressiv-regressiven („shallowing-upward“, „brining-upward“) Trends und charakteristischem Faziesverhalten. In den geophysikalischen Bohrlochmessungen (Gamma-Ray-, Sonic-Log) sind die Zyklen durch charakteristische Logbilder gekennzeichnet. Die Zyklen können eindeutig den lithostratigraphischen Einheiten des Mittleren Muschelkalks, der Karlstadt-, der Heilbronn- und der Diemel-Formation, zugeordnet werden.

Basierend auf der Zyklischen Gliederung des Standardprofils Remlingen 7 wurden 60 Bohrungen Norddeutschlands mit Hilfe von Gamma-Ray- und Sonic-Log miteinander korreliert. Die einzelnen Zyklen lassen sich trotz lateraler Faziesschwankungen und Mächtigkeitsänderungen durch das gesamte Norddeutsche Becken verfolgen.

Der erste Zyklus, der der Karlstadt-Formation zugerechnet wird, wird im gesamten Becken von Dolomiten/Dolomitmergeln aufgebaut, massive Anhydrite und Steinsalz kamen nicht zur Ablagerung. Die Zyklen 2 – 8 (Heilbronn-Formation) zeigen regional eine unterschiedliche lithologische Ausbildung und Mächtigkeitsentwicklung. Der zweite Zyklus ist mit Dolomiten bis Steinsalz nur im Beckenzentrum vollständig ausgebildet. Zum Beckenrand hin tritt Steinsalz zurück und Dolomit, Anhydrit und Steinsalz des dritten Zyklus lagern direkt auf den Sulfaten des zweiten Zyklus. Das Steinsalz des dritten Zyklus ist im Bereich des Norddeutschen Beckens am weitesten verbreitet und am mächtigsten. Der Zyklus 4 zeigt eine dem Zyklus 3 ähnliche Ausbildung und Verbreitung. Während in mehr beckenrandlich gelegenen Gebieten nur die Zyklen 3 und 4 steinsalzführend sind, enthält im Beckenzentrum neben dem Zyklus 2 auch der Zyklus 5 Halit. Die Zyklen 6 - 8 werden in der Regel im gesamten Becken von Dolomit und Anhydrit aufgebaut. Die Grenze zum Zyklus 9, der Diemel-Formation, wird durch das letztmalige Auftreten von synsedimentären Anhydrit bestimmt. Im Zyklus 9 dominiert eine Karbonatsedimentation.

Geochemisch lassen sich einheitliche Entwicklungstendenzen sowohl der Elementverteilungen als auch der -konzentrationen innerhalb der Zyklen aufzeigen. Gegenüber dem Zyklus 1 haben die Zyklen 2 - 8 der Heilbronn-Formation deutlich höhere Gehalte an Ca und SO₃, leicht erhöhte Gehalte an den terrigenen Elementen sowie geringe Mg-Konzentrationen. Auffällig sind markant erhöhte Zr-Gehalte. Hohe Gehalte terrigen gebundener Elemente kennzeichnen jeweils die Basis der einzelnen Zyklen. Diese belegen verdünnende marine und kontinentale Zuflüssen mit gelöster oder detritischer Fracht. Zum Hangenden nehmen diese Konzentrationen ab. Konzentrationsänderungen hin zu überwiegend hohen Gehalten an salinaren Elementen am Top der Zyklen korrelieren sehr gut mit den ausgehaltenen Zyklen. Der Zyklus 9 lässt im Chemismus eine deutliche Zweiteilung erkennen, die auf Konzentrationsänderungen von Ca, Mg und Sr sowie der terrigenen Elemente zurückgeführt wird. An der Grenze zum Oberen Muschelkalk steigt das Ca/Mg-Verhältnis markant an.

Es zeigte sich, dass die Sedimentation zur Zeit des Mittleren Muschelkalks nicht allein durch Subsidenz, sondern auch durch synsedimentäre Tektonik mit Horst- und Grabenbildungen gesteuert wurde. In den Grabenstrukturen führte eine verstärkte Subsidenz zu höheren Mächtigkeiten und größerer Vollständigkeit der einzelnen Zyklen. So wurden im Westdorf-Graben (Ostfriesland) neben extrem hohen Mächtigkeiten auch in den Zyklen 6 und 7 Steinsalze erbohrt.

Die detaillierte Zyklische Gliederung ermöglichte die Korrelation unterschiedlicher Gliederungen des Mittleren Muschelkalks im Arbeitsgebiet sowie eine Anbindung der Schichtenfolge an die süddeutschen Triasgebiete.

Palynologische Bestimmungen kennzeichnen den Mittleren Muschelkalk als einen hochsalinaren, lebensfeindlichen Ablagerungsraum, in denen die von Landpflanzen stammenden Palynomorphen, vorwiegend Pollen, meist eingeweht wurden. Einen Süß- und Brackwassereinfluss belegt das Pollenspektrum im oberen Abschnitt des Zyklus 9. Während für den Mittleren Muschelkalk das fast völlige Fehlen von Acritarchen kennzeichnend ist, zeigt das Einsetzen von Acritarchen in den obersten Zentimetern des Zyklus 9 den Umschwung zu marinen subtidalen Ablagerungsbedingungen an. Dieser faciale Umschwung spiegelt sich auch in der Stöchiometrie der Dolomite wider.

Sequenzstratigraphisch werden die Zyklen des salinaren Mittleren Muschelkalks als Parasequenzen mit transgressiv-regressivem („brining-upward“, „shallowing-upward“) Trend gedeutet. Sie werden alternativ auch als hochfrequente Sequenzen interpretiert. Die HF-Sequenzgrenzen werden an der Basis von Halithorizonten gezogen, die in ihrer gesamten Mächtigkeit dem HFS-Tiefstand-Systemtrakt zugerechnet werden. Laminierte, mikritisch dolomitische Mudstones mit z. T. erheblichem Mergelanteil repräsentieren den HFS-Transgressiv-Systemtrakt. Diese werden von Anhydriten des HFS-Hochstand-Systemtrakts überlagert.

Die untersuchte Schichtenfolge umfasst sowohl Bereiche der Ablagerungssequenz M1 des Germanischen Muschelkalks als auch Bereiche der Ablagerungssequenz M2 (AIGNER & BACHMANN 1992). Dabei werden die Zyklus 1 dem späten Hochstand-Systemtrakt der ersten Ablagerungssequenz (M1) zugeordnet. Die Sequenzgrenze liegt an der Basis des Zyklus 2. Die Zyklen 2 bis 8 (Heilbronn-Formation) sowie der untere Teil des Zyklus 9 (untere Diemel-Formation) repräsentieren den Tiefstand-Systemtrakt der zweiten Muschelkalk-Sequenz (M2). Das Einsetzen mariner Fauna in der oberen Diemel-Formation definiert den „Transgressionshorizont“ (transgressive surface). Der Transgressive Systemtrakt beginnt mit dem oberen Teil des Zyklus 9 (obere Diemel-Formation) und reicht bis in den Oberen Muschelkalk. Diese Untersuchungen bestätigen und modifizieren die sequenzstratigraphische Interpretation von AIGNER & BACHMANN (1992).

1 EINLEITUNG

Ziel der Untersuchungen ist es, den Mittleren Muschelkalk im Norddeutschen Becken als Teil des Mitteleuropäischen Beckens anhand von Bohrungsdaten lithostratigraphisch im Detail zu gliedern und ein sequenzstratigraphisches Modell zu erstellen. Obwohl der Mittlere Muschelkalk des Norddeutschen Beckens aus zahlreichen regionalen Einzelarbeiten (s. a. Tab. 4) bekannt ist, existierte eine beckenweit anwendbare Feingliederung bisher nicht. Eine Korrelation von lithostratigraphisch-sedimentologischen Aufschlussdaten mit Bohrungsdaten lag bislang ebenfalls nicht vor. Für eine detaillierte Analyse der Beckenentwicklung bzw. eine Rekonstruktion der paläogeographischen Entwicklung, des Subsidenzverhaltens sowie tektonischer Bewegungen ist es jedoch zwingend notwendig, eine Schichtenfolge in möglichst kleine und auch beckenweit korrelierbare Untereinheiten zu gliedern. Mit der vorliegenden Arbeit wird für das gesamte Norddeutsche Becken erstmalig eine einheitliche kleinzyklische Gliederung vorgestellt. Weiterhin soll ein Beitrag zu einem verbesserten sequenzstratigraphischen Konzept der germanischen Trias sowie zur Klärung der noch immer unzureichend verstandenen evaporitischen Sedimentation in einem sequenzstratigraphischen Rahmen geliefert werden.

Das Norddeutsche Becken ist für sequenzstratigraphische Fragestellungen besonders geeignet, da die triassische Schichtenfolge einschließlich des Muschelkalks dort besonders mächtig und stratigraphisch vollständig ist. Es existieren jedoch auch Schwellenbereiche, auf denen die Sequenzgrenzen besonders ausgeprägt sind.

Der Muschelkalk besteht nach derzeitiger Auffassung aus zwei marinen Sequenzen (M1, M2), die zwischen den vorwiegend terrestrischen Sequenzen des Buntsandsteins und Keupers eingeschaltet sind und eine maximale Transgression repräsentieren (AIGNER & BACHMANNN 1992, Abb. 1). Die Sequenzgrenze zwischen M1 und M2 scheint im evaporitischen Mittleren Muschelkalk zu liegen, dem als regressives Intervall besondere Bedeutung zukommt.

Die Parasequenzen des Mittleren Muschelkalks sollen lithologisch, mikrofaziell und geochemisch charakterisiert werden. Sie werden an Bohrkernen geeicht und mit Hilfe von geophysikalischen Bohrlochmessungen verfolgt. Mit Hilfe einer nach Möglichkeit beckenweit gültigen kleinzyklischen Untergliederung soll aufgezeigt werden, welche sequenzstratigraphische Stellung der Mittlere Muschelkalk einnimmt, wo sich die mutmaßliche Sequenzgrenze befindet, und ob es zu Schichtausfällen kommt. Schließlich ist zu klären, welche Rolle Subsidenz, Tektonik und Meeresspiegelschwankungen spielen.

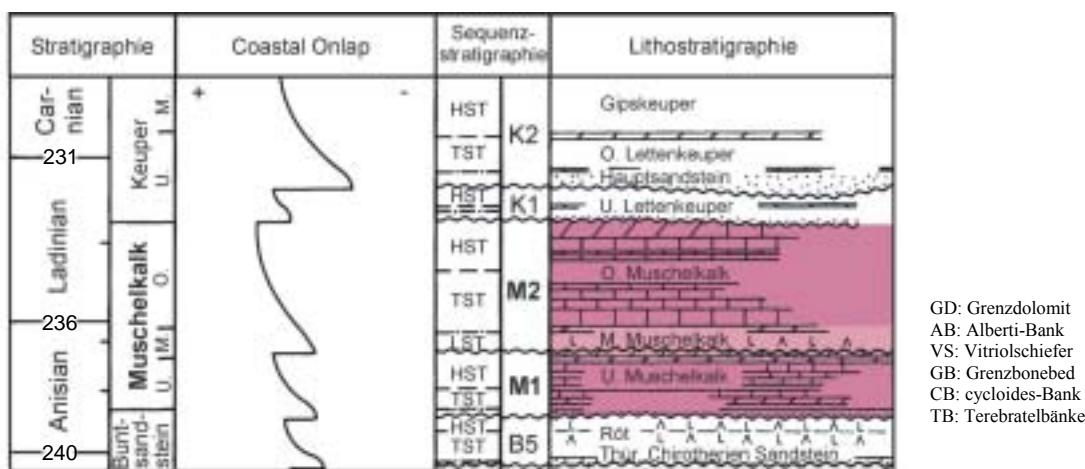


Abb. 1: Sequenzstratigraphisches Konzept für den Muschelkalk des Mitteleuropäischen Beckens nach AIGNER & BACHMANN (1992), Zeitskala nach MENNING (1995)

2 GEOLOGISCHER RAHMEN

2.1 Paläogeographie

Ab dem jüngsten Oberkarbon bzw. dem älteren Perm leiten großräumige Rift-Prozesse das Auseinanderbrechen des nach der variszischen Gebirgsbildung entstandenen Superkontinents Pangäa ein (ZIEGLER 1990). Während der Trias bestimmten regionale Krustendehnungen die Entwicklung Mitteleuropas. An z. T. reaktivierten variszischen Frakturen kam es zur Absenkung komplexer Grabensysteme. Ihre Entwicklung stand in einem engen Zusammenhang mit den Riftsystemen Arktik-Nordatlantik und Tethys-Zentralatlantik-Golf von Mexiko, an denen der Superkontinent Pangäa im Verlaufe des Mesozoikums und Känozoikums zerbrach (ZIEGLER 1982).

Sedimentationsraum der Trias in „germanischer Fazies“ war das Mitteleuropäische Becken. Dieses Becken reichte von England im Westen bis nach Polen und Weißrussland im Osten. In Nord-Süd-Richtung erstreckte es sich von Skandinavien sowie der nördlichen Nordsee im Norden bis Belgien und Tschechien sowie mit einer südlichen Ausbuchtung über Süddeutschland und Südostfrankreich bis in die Schweiz.

Die Umrahmung des Mitteleuropäischen Beckens bildeten ausgedehnte Grundgebirgsmassive bzw. Tafelgebiete: im Norden das Fennoskandische Massiv, im Osten das Baltisch-Russische Massiv und am Beckensüdrand das Böhmisches und das Vindelizische Massiv, die das mitteleuropäische „germanische“ vom tethyalen Trias-Becken trennen (Abb. 2). Den südwestlichen Beckenrand bildeten das Gallisch-Ardennische Massiv und das nordwestlich daran anschließende London-Brabanter Massiv. Im Westen, im Gebiet der Britischen Inseln stellten das Welsh High, das Pennine High und das Grampian High die Beckenbegrenzung dar. Die East-Shetland-Platform grenzte das Mitteleuropäische Becken gegen den sich öffnenden Arktik-Nordatlantik ab. Ein weiteres bedeutendes Hochgebiet während der Trias war das Rheinische Massiv, das dem Gallisch-Ardennischen Massiv im Osten vorgelagert war und während der gesamten Trias Festland und damit Sedimentliefergebiet war.

Das Mitteleuropäische Becken wurde durch eine WNW-ESE streichende Schwellenzone (Mid North Sea High - Ringköbing-Fünen-Hoch - Rügen-Schwelle) in zwei langgestreckte Teilbecken, das nördliche und das südliche Mitteleuropäische Becken getrennt. Diese entwickelten sich dabei kontinuierlich aus der „Central European depression“ (KATZUNG 1975) bzw. aus dem Nördlichen und Südlichen Permbecken (Northern and Southern Permian Basin, ZIEGLER 1982) fort. Verbindungen zwischen den beiden Beckenteilen bestanden z. B. über die bedeutenden Grabenstrukturen des Zentral-Grabens oder des Horn-Grabens.

Ablagerungsraum der klassischen, dreigeteilten „Germanischen Trias“ war im wesentlichen das aus dem Südlichen Permbecken hervorgegangene NW-SE streichende südliche Mitteleuropäische Becken, in dem sich anhand von Mächtigkeits- und Faziesdifferenzierungen drei größere Sedimentationsräume abgrenzen lassen. Dies sind das Südliche Nordseebecken sowie die Triasgebiete der Britischen Inseln im Westen, das Norddeutsche Becken und die Süddeutschen Triasgebiete im zentralen Teil sowie die Polnischen Triasgebiete im Osten. Von diesen drei Teilbecken stellte die WNW-ESE gerichtete Zentrale Senke des Norddeutschen Beckens sowie die Süddeutschen Triasgebiete das eigentliche Beckenzentrum dar. Der Sedimentationsraum des Norddeutschen Beckens reichte vom Zentral-Graben im Westen bis zur Ostbrandenburg-Schwelle im Osten und wird im Norden vom Ringköbing-Fünen-Hoch und der Rügen-Schwelle begrenzt, während im Süden die thüringischen, niedersächsischen und nordhessischen Muschelkalkgebiete zu den Süddeutschen Triasgebieten überleiten.

Nach einem globalen Meeresspiegel-Tiefstand gegen Ende des Perms war während der Trias ein genereller zyklischer Anstieg des Meeresspiegels zu beobachten (VAIL et al. 1977, BRANDNER 1984). Vom späten Skyth an beeinflussten Transgressionen aus dem Gebiet der Tethys die Sedimentation im

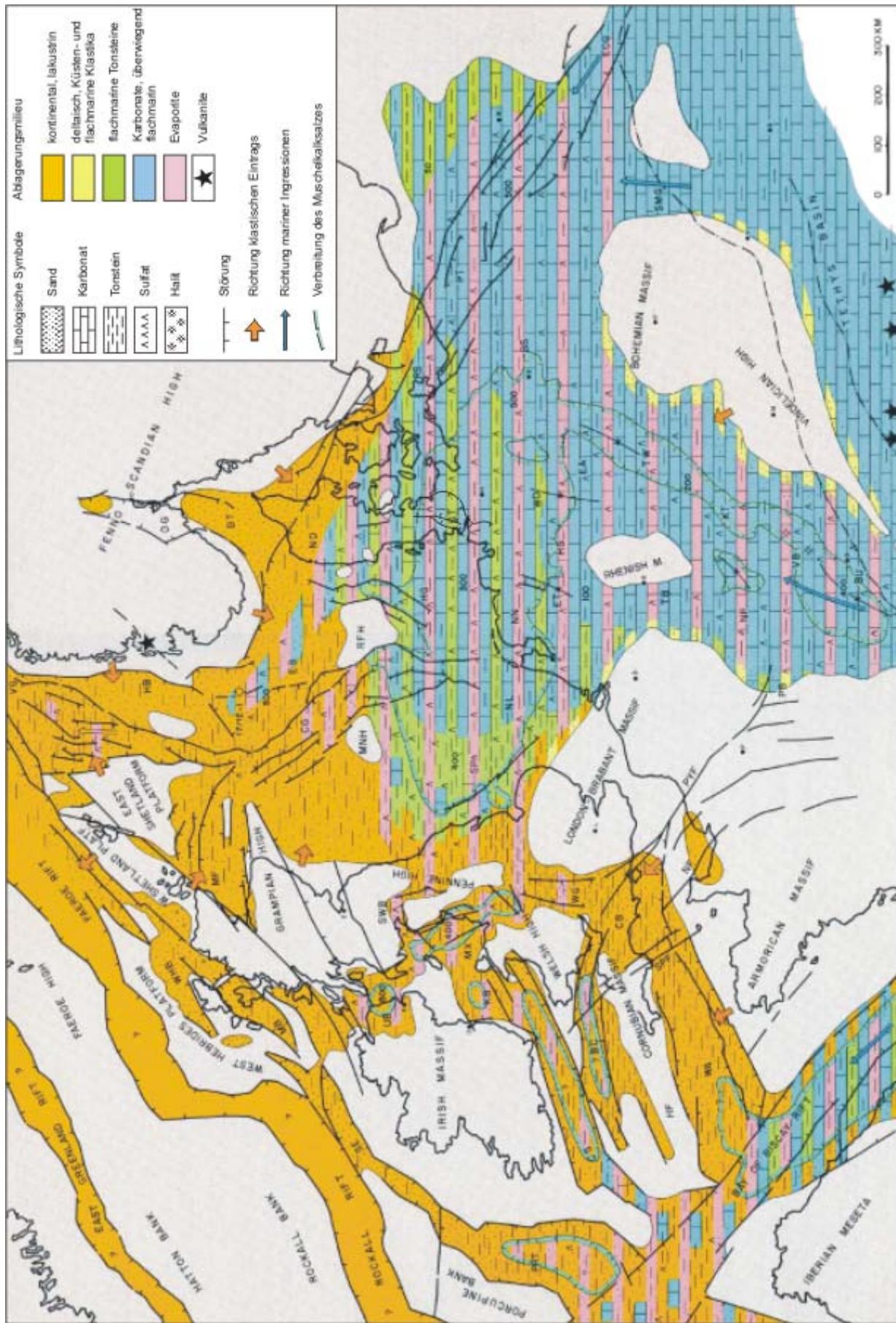


Abb. 2: Paläogeographie der Mitteltrias (Anis-Ladin; leicht verändert nach ZIEGLER 1990)

südlichen Mitteleuropäischen Becken. Die Verbindungen zum pelagischen Tethysraum wurden dabei zur Zeit des Oberskyths sowie des Unter- und älteren Oberanis nur aufgrund tektonischer Prozesse, wie z. B. der Anlage von Grabenstrukturen möglich (MOSTLER 1993). Eine erste Transgression über die Ostkarpaten-Pforte, einer bereits zu früherer Zeit angelegten Grabenstruktur, überflutete am Ende des Skyths (Oberer Buntsandstein) erstmals das Mitteleuropäische Becken. Zu Beginn des Anis kam es regional zu Regressionen, die jedoch die Sedimentation in Polen nicht beeinflussten; dort kam es zu einer kontinuierlichen Karbonatsedimentation über die Skyth-Anis-Grenze hinweg (ZIEGLER 1982).

Ein weiterer Meeresspiegelanstieg verursachte die Muschelkalk-Transgression im mittleren Anis. Zusätzlich zur Ostkarpaten-Pforte öffnete sich im höheren Anis, zu Beginn des Pelsons, die Schlesisch-Mährische Pforte. Eine weitere marine Verbindung bestand während des Pelsons zeitweise über die Burgundische Pforte. Im Beckenzentrum wurden die Karbonate des Unteren Muschelkalks abgelagert, an den Beckenrändern gelangten teilweise noch klastische Schüttungen in das Becken (ZIEGLER 1982). Seinen ersten Höchststand während der Trias erreichte der Meeresspiegel im Bereich der Terebratellbänke des Unteren Muschelkalks.

Im oberen Anis war die Verbindung des Mitteleuropäischen Beckens mit der Tethys wieder eingeschränkt; die Evaporite des Mittleren Muschelkalks wurden abgelagert. Mit einem erneuten Meeresspiegelanstieg an der Wende Anis/Ladin, im späten Illyr, stellten sich erneut vollmarine Bedingungen ein. Im Bereich der *cycloides*-Bank des Oberen Muschelkalks wurde der zweite Meeresspiegelhöchststand in der Trias erreicht (AIGNER & BACHMANN 1992). Eine Verbindung zur Tethys erfolgte über die Burgundische Pforte; auch südliche Teile des Polnischen Trogos ließen wieder Verbindungswwege offen (ZIEGLER 1982).

Ab dem höheren Ladin kam es zu einer Regression. Die marine Entwicklung der Trias wurde schließlich von der festländisch geprägten Sedimentation des Keupers abgelöst. Die Lettenkeuper-Fazies mit feinkörnigen terrigenen Sedimenten rückte langsam in südwestliche Richtung vor.

Nach paläogeographischen Rekonstruktionen driftete Pangäa während des späten Paläozoikums und des frühen Mesozoikums nordwärts. West- und Mitteleuropa wanderten aus ihrer äquatorialen Position im Westfal A und B in den Bereich der nördlichen Passatwinde. Für das Germanische Trias-Becken wird eine Position zwischen 15° und 20° nördlicher Breite angenommen. Es herrschte ganzjährig ein subtropisch-tropisches, arides Klima (HABICHT 1979).

2.2 Lithostratigraphie

Der Mittleren Muschelkalks ist im Vergleich zu dem besser aufgeschlossenen Unteren und Oberen Muschelkalk weniger erforscht; detaillierte lithostratigraphische Untersuchungen sind selten. Ein Grund ist die geringe Subrosionsbeständigkeit der salinaren Schichtenfolge des Mittleren Muschelkalks, der aus Dolomiten, Dolomitmergeln, Mergeln, Tonmergeln, dolomitischem Kalksteinen, Anhydriten, Gipsen und Steinsalzen aufgebaut wird. Infolge von Ablaugung bis in Teufen von ca. 450 m unter Flur fehlen die Salinarbildungen des Mittleren Muschelkalks z. T. großflächig im oberflächennahen Bereich. Vollständige Profile, in denen die Salinare heute noch erhalten sind, finden sich nur in Tiefbohrungen und untertägigen Aufschlüssen.

Der Mittlere Muschelkalk im Mitteleuropäischen Becken zeichnet sich durch seine einheitliche lithologische Ausbildung aus. Größere Differenzierungen sind nur im Bereich der Salinarbildungen zu beobachten. Das Steinsalz wurde ausschließlich in den tieferen Beckenteilen ausgeschieden. Drei Typen klassifizieren die regionale Verteilung der Salinarfazies im Bereich des Mitteleuropäischen Beckens: die Halitfazies, die halitfreie Sulfatfazies und der Übergang von Sulfat- zu Dolomitfazies (BEUTLER 1993, TRUSHEIM 1971, SCHRÖDER 1964).

In den im Norddeutschen Becken abgeteuften Tiefbohrungen der auf Erdöl/Erdgas explorierenden Firmen erfolgt bis heute zumeist nur eine Grobgliederung des Mittleren Muschelkalks in **Untere Dolomitmergel**, **Muschelkalk-Salinar** und **Obere Dolomitmergel**. Diese stratigraphischen Einheiten werden auf Beschluss der Subkommission Perm-Trias der Deutschen Union für Geologische Wissenschaften (DUGW) als **Karlstadt-Formation**, **Heilbronn-Formation** und **Diemel-Formation** bezeichnet (Protokoll der Sitzung, 19. Juli 1997 in Gotha, Tab. 4).

Der Mittlere Muschelkalk Nord- und Mitteldeutschlands einschließlich Thüringens und Hessens war Gegenstand der Arbeiten von BESTEL (1929), LOTZE (1933), WOLBURG (1956, 1969), SEIDEL (1965), HOPPE (1966), ALTHEN et al. (1980), SCHULZE (1964), SCHWAHN & GAHRMANN (1976), PÄTZ (1965), RADZINSKI (1971), BACKHAUS (1969), BRÜCKNER-RÖHLING & LANGBEIN (1993), GAERTNER & RÖHLING (1993), DÜNKEL & VATH (1990), DÜNKEL (1992). Besondere Bedeutung erlangten in diesem Raum die Untersuchungen von KOZUR (1974, 1975), der sich vorwiegend mit den biostratigraphischen Gliederungen beschäftigte. Eine zusammenfassende Darstellung zum Mittleren Muschelkalk von Hessen mit Korrelationen nach Süddeutschland gaben HAGDORN et al. (1987).

Gliederungen des Mittleren Muschelkalks in Tiefbohrungen wurden in Westdeutschland von WOLBURG (1969) sowie in Ostdeutschland von SCHULZE (1964), ALTHEN et al. (1980), BEUTLER (1993) und BRÜCKNER-RÖHLING & LANGBEIN (1993) vorgenommen. Eine auf Gamma-Ray- und Sonic-Logs basierende lithostratigraphische Untergliederung in 13 Kleinzyklen wurde für Nordwestdeutschland von GAERTNER & RÖHLING (1993) vorgelegt.

In Süddeutschland gehen erste Arbeiten zur Lithostratigraphie auf REIS (1901) und GENSER (1930) zurück. Weitere Untersuchungen erfolgten durch SCHACHL (1954), WILD (1968), SIMON (1982, 1988), FRIEDEL (1988), FRIEDEL & SCHWEIZER (1991), MAQSUD (1986) und ROTHE (1993).

DRONKERT (1987), DRONKERT et al. (1990), WIDMER (1991) und HAUBER (1993) beschäftigten sich mit dem Mittleren Muschelkalk im Bereich des Hochrheins. Der Mittlere Muschelkalk des Pariser Beckens war Gegenstand der Arbeit von GEISLER-CUSSEY (1987).

3 UNTERSUCHUNGSMETHODIK UND DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN

3.1 Datenmaterial

3.1.1 Bohrdaten

Im Norddeutschen Becken basieren die Kenntnisse über die Schichtenfolge des Mittleren Muschelkalks vor allem auf Tiefbohrungen, da Tagesaufschlüsse selten sind. Vor allem durch die Erdöl- und Erdgas-Exploration wurde der Mittlere Muschelkalk in mehreren tausend Bohrungen erschlossen.

Zur Bearbeitung wurden nur solche Bohrungen ausgewählt, in denen neben der natürlichen Radioaktivität (Gamma-Ray) vor allem auch die Schallgeschwindigkeit (Sonic-Log) gemessen wurde. Ein weiteres Auswahlkriterium stellte die strukturelle Position der Bohrungen innerhalb des Norddeutschen Beckens dar. Entsprechend der Schollengliederung des sich auch im Mesozoikum immer wieder durchpausenden präsalinaren Sockels (BALDSCHUHN & KOCKEL 1997) wurden für die verschiedenen Einzelschollen repräsentative Bohrungen ausgewählt (Abb. 3, Tab. 16). Auch wurden möglichst nur tektonisch ungestörte Profile zur Bearbeitung herangezogen.

3.1.2 Kernmaterial

In Norddeutschland ist der Mittlere Muschelkalk, da er nicht Explorationsziel ist, in Bohrungen nur selten gekernt. Die vorliegenden Untersuchungen wurden an der Bohrung Remlingen 7 durchgeführt, eine der wenigen Bohrungen, die durchgängig gekernt und auch geophysikalisch umfangreich vermessen sind. In dieser Bohrung ist der saline Bereich des Mittleren Muschelkalks vollständig erhalten; die Steinsalze sind nicht abgelaugt. Die Bohrung Remlingen 7 wurde von der „Gesellschaft für Strahlenforschung (GSF) - Forschungsbergwerk Asse“ zur Verfügung gestellt. Sie ist Bestandteil des vom „GSF - Institut für Tieflagerung“ in den 80-er Jahren durchgeföhrten Tiefbohr-Erkundungsprogramms im Bereich der Schachtanlage Asse (KLARR et al. 1990). In dieser Kernbohrung wurde ein Profil vom höheren Teil des Unterem Muschelkalks bis in den Oberen Muschelkalk aufgenommen und insgesamt eine Kernstrecke von 178 m bearbeitet. Für mikrofazielle, geochemische, mineralogische und palynologische Untersuchungen wurden insgesamt 176 Proben entnommen. Die Proben wurden entsprechend der wechselnden lithologischen Ausbildung genommen. Die Probendichte ist deshalb oft unterschiedlich.

3.2 Geophysikalische Untersuchungen

In Tiefbohrungen werden mit geophysikalischen Bohrlochmessverfahren kontinuierliche Profile geophysikalischer Parameter gemessen, die in direktem Zusammenhang mit den gesteinsphysikalischen Eigenschaften und der mineralogisch-geochemischen Zusammensetzung der Gesteine stehen. Zur Bestimmung der jeweiligen geophysikalischen Gesteinsparameter werden unterschiedliche Messmethoden angewandt. Tab. 1 gibt eine Übersicht über die lithologischen Aussagen von geophysikalischen Bohrlochmessungen.

Für die hier durchgeföhrten Untersuchungen wurde auf die Logkombination von Gamma-Ray (natürliche Radioaktivität) und Sonic-Log (Ultraschall-Laufzeiten) im Maßstab 1:1 000 zurückgegriffen. Im folgenden Abschnitt wird ein kurzer Überblick dieser geophysikalischen Messmethoden gegeben.

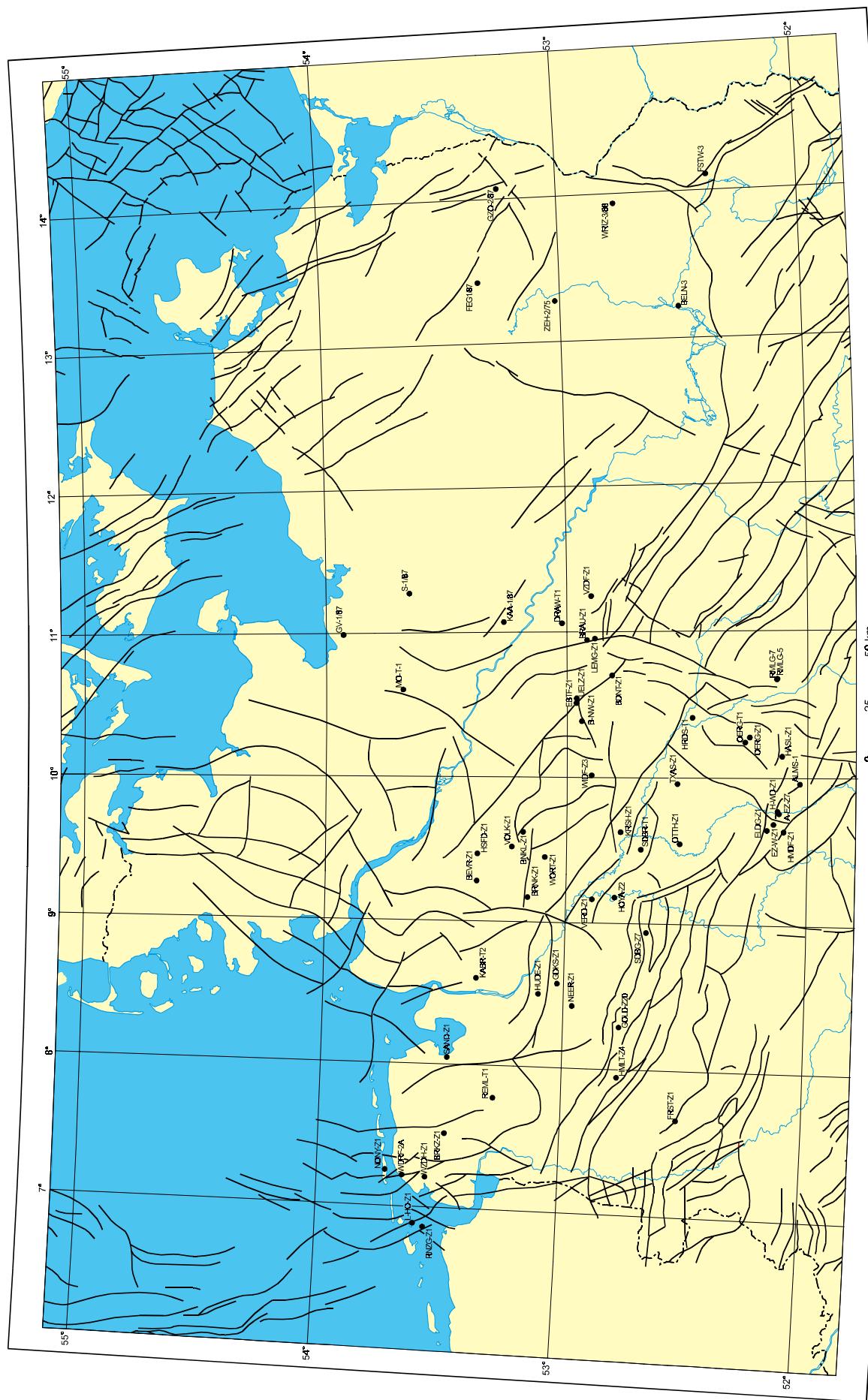


Abb. 3: Bearbeitete Bohrungen innerhalb des Sockelschliffmusters von Norddeutschland (nach BALDSCHUHN & KOCKEL 1997)

Die für die Untergliederung der Schichtenfolge notwendigen Details lassen sich in diesem Maßstab gut erkennen und auch regional korrelieren. Um das Gamma-Ray-Log der geophysikalischen Bohrlochvermessung lithologisch und sedimentologisch zu interpretieren, ist eine Eichung am Kernmaterial unerlässlich. Daher wurde die natürliche Gammastrahlung zusätzlich zu den industriellen Messungen im Bohrloch an den Bohrkernen der Bohrung Remlingen 7 gemessen (s. Kap. 5.3).

	Elektrische Messungen		Radioaktivitätsmessungen			Schallmessungen	
	Leitfähigkeit, Widerstand	Spontanes Potential	Gamma- Ray	Neutron	FDL (Gamma- Gamma)	Sonic Log	
Tone, Tonsteine	meist hohe Leitfähigkeit	hohe Spannungswerte	starke Strahlung	starke Absorption	Dichte abhängig von der Porosität (Kompressionszustand)	relativ niedrige Geschwindigkeiten abhängig von der Porosität (Kompressionszustand)	
toniger Sand		mittlere Spannungswerte	mittlere Strahlung	mittlere Absorption			
Sande, Sandsteine, grobklastische Gesteine	Leitfähigkeit u. Widerstand abhängig von Porenfüllung	geringe Spannungswerte	geringe Strahlung	Absorption abhängig von der Porosität! (stark bei großer Porosität)		Tone, Tonsteine: ca. 580 - 300 µs/m Sande, Sandsteine: ca. 500 - 200 µs/m	
Kalke, Kalksteine, Dolomite	sehr geringe Leitfähigkeit, sehr hoher Widerstand Ausnahme: große Porosität	mittlere bis hohe Geschwindigkeiten, z.T. abhängig von der Porosität; Kalke, Kalksteine: ca. 350 - 180 µs/m					
Gips, Anhydrit	sehr geringe Leitfähigkeit	indifferent	sehr geringe Strahlung	geringe Absorption	hohe Dichte	sehr hohe Geschwindigkeiten Anhydrit: 180 - 160 µs/m	
Steinsalz	sehr hoher Widerstand				geringe Dichte	mittlere Geschwindigkeiten 240 - 220 µs/m	
Kalisalze					mittlere bis hohe Geschwindigkeiten ca. 270-190 µs/m		

Tab. 1: Lithologische Aussage von Bohrlogs (nach JANKOWSKY 1983)

3.2.1 Gamma-Ray-Messungen im Bohrloch

Ein häufig angewandtes Bohrlochmessverfahren ist das Gamma-Logging, die Messung der natürlichen Radioaktivität der Gesteine. Nahezu die gesamte Gammastrahlung der Erde entsteht beim Zerfall des radioaktiven Kalium-Isotops (K^{40}) und der radioaktiven Elemente der Thorium- und Uran-Radium-Reihe. In Sedimentgesteinen bewirken vor allem die Tonminerale aufgrund ihres Gehaltes an K^{40} die natürliche Radioaktivität, so dass die Gamma-Intensität im allgemeinen den Tongehalt reflektiert. In Evaporiten können mit Hilfe des Gamma-Ray-Logs kalireiche Einschaltungen im Steinsalz erkannt werden (ca. 15 API entsprechen dabei etwa 1% K_2O). Der Verlauf der Gamma-Kurve ist somit im wesentlichen an die lithologische Ausbildung des Gesteinspaketes geknüpft. Ein Gamma-Ray-Log verschiedener Gesteinstypen zeigt Abb. 4.

Die Gammastrahlung in den Gesteinen ist allgemein sehr gering, jedoch mit den heutigen modernen messtechnischen Methoden mess- und quantifizierbar. Tab. 2 gibt einen Überblick über die anhand von Bohrlochmessungen festgestellte durchschnittliche Radioaktivität der Gesteine.

Die natürliche Radioaktivität wird mit einer Gamma-Ray-Sonde, dem Szintillometer gemessen. Dabei wird die Sonde von unten nach oben mit einer Geschwindigkeit von mehreren m/s durch das

Bohrloch gezogen (Schlumberger-Verfahren) und die Strahlungsmesswerte in API-Einheiten (American Petroleum Institut) aufgezeichnet. Die API-Einheit ist definiert als 1/200 der Differenz zwischen dem minimalen und dem maximalen Ausschlag des Gamma-Ray-Logs in einer Eichbohrung mit Zonen niedriger und hoher Radioaktivität. Die natürliche Radioaktivität in Sedimentgesteinen reicht von einigen API in Anhydrit oder Steinsalz bis zu 200 API und mehr in Tonsteinen und Schiefern. Das vertikale Auflösungsvermögen der Gamma-Messung in Bohrungen liegt bei ca. 30 cm.

Gestein	Gamma-Ray in API
Tonstein	24 - 1000
Sandstein	18 - 160
Kalkstein	18 - 100
Dolomit	12 - 100
Steinsalz	0
Anhydrit	0 - 12
Gips	0
Polyhalit	200
Sylvinit	500

Tab. 2: Durchschnittliche Radioaktivität ausgewählter Gesteine (RIDER 1996)

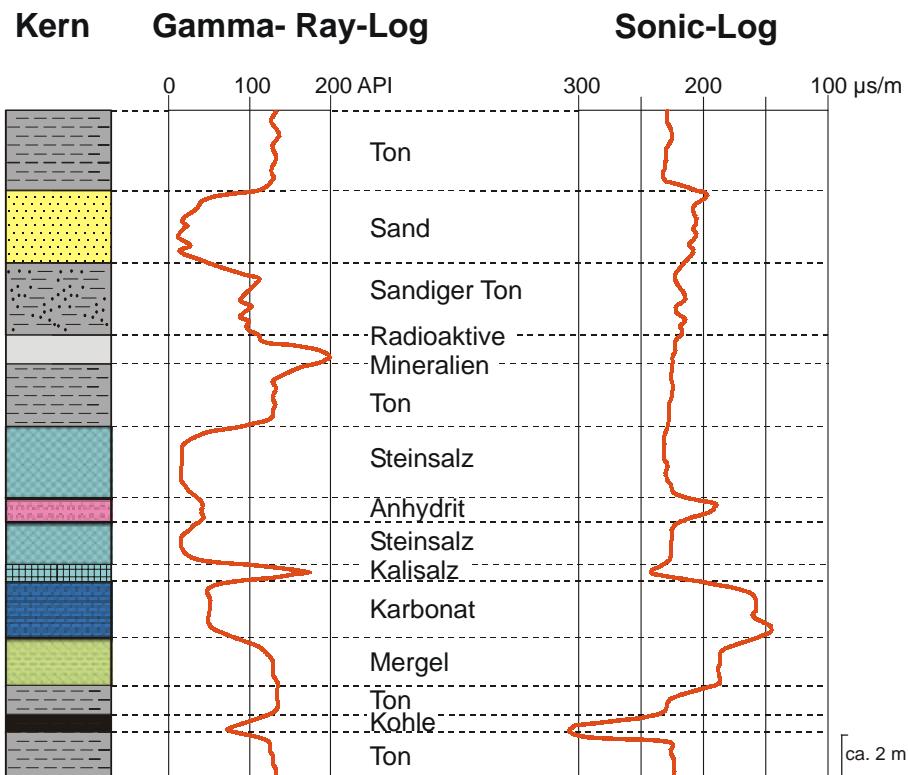


Abb. 2: Gamma-Ray- und Sonic-Log verschiedener Sedimente (ergänzt nach BRADEL 1985)

3.2.2 Gamma-Ray-Messungen an Bohrkernen

Mit der „Heger-Sonde“ der Firma G. B.-H. Elektronik (Walter HEGER, Uetze) steht seit einigen Jahren ein tragbarer Gamma-Szintillometer zur Verfügung, mit dem sowohl in Aufschlüssen als auch an Bohrkernen radiometrische Messungen durchgeführt werden können (KOCH 1984, BINOT & RÖHLING 1988, Abb. 5). Die Messgenauigkeit entspricht der von Bohrlochmesssonden, das Auflösungsvermögen der Messungen ist gegenüber der Bohrlochvermessung aufgrund einer engeren Messpunktdichte jedoch wesentlich höher.

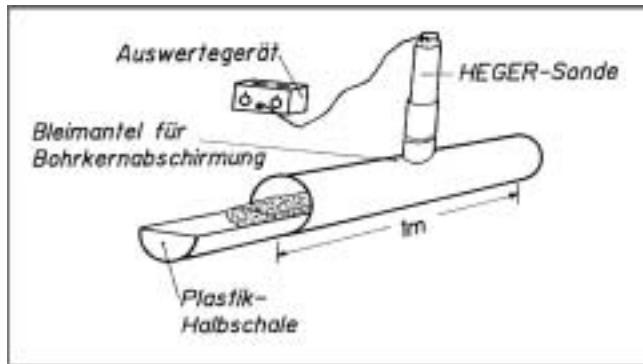


Abb. 3: Messprinzip der Heger-Sonde zur Bestimmung der natürlichen Radioaktivität an Bohrkernen

Die verwendete Gamma-Messsonde gehört zum Typ der Gamma-Szintillometer mit einem 40 mm * 50 mm NaJ (TQ)-Kristall, der zur Erfassung der einfallenden Gamma-Quanten dient. Die Eingangssignale werden durch einen nachgeschalteten Photomultiplier (10 Verstärkungsstufen) und eine Impulsverstärker-Anordnung geleitet. Verstellbare Messintervalle sorgen für eine anwendungsorientierte Messstatistik, das Auswertegerät zählt und integriert die Impulse über die Zeit. Die Ausgabe erfolgt in Impulsen pro Sekunde (counts per second, cps). Um die Hintergrundstrahlung möglichst gering zu halten wird der Bohrkern durch eine Bleiröhre abgeschirmt. Bei diesem Messverfahren liegt der Bohrkern auf einer PVC-Halbschale und wird in 5 cm-Schritten durch die Bleiröhre geschoben. Die Messsonde wird dabei in direkten Kontakt zum Bohrkern gebracht (Abb. 5). Pro Messpunkt erfolgten drei Messungen (jeweils 10 s), deren Ergebnisse dann gemittelt wurden. Aus diesen Messwerten wurde dann mit Hilfe des Computer-Programms „XY-Plot“ (KÖHLER 1992) eine Gamma-Kurve erzeugt, die durch Stauchung bzw. Spreizung an die Kalibrierung eines industriellen Gamma-Ray-Logs angeglichen werden konnte.

3.2.3 Sonic-Messungen

Jedes Gestein hat eine spezifische Schallgeschwindigkeit, die abhängig ist von der Dichte und Elastizität des Gesteins (Tab. 3). Das Sonic-Log misst die Laufzeit des von einem Sender am unteren Ende einer Sonde erzeugten Schallimpulses durch das das Bohrloch umgebende Gestein zu einem oder mehreren Empfängern am oberen Ende. Im Log wird die Schall-Laufzeit Δt vom Sender durch die Bohrlochwand zum Empfänger in Mikrosekunden pro Meter ($\mu\text{s}/\text{m}$) aufgezeichnet (Abb. 4). Der Abstand zwischen Sender und den zugehörigen Empfängern (mehrere Dezimeter bis ein Meter) bestimmt die Auflösegenauigkeit, d.h. die geringste Mächtigkeit einer Gesteinsschicht, deren spezifische Geschwindigkeit noch gemessen werden kann.

Gestein	Schall-Laufzeit in $\mu\text{s}/\text{m}$
Tonstein	197-558
Sandstein	174-328
Kalkstein	156-174
Dolomit	126-148
Steinsalz	219-220
Anhydrit	164
Gips	171-174
Polyhalit	189-190
Sylvinit	243

Tab. 3: Durchschnittliche Schall-Laufzeiten in Gesteinen (RIDER 1996)

3.3 Korrelationen

Um das Gamma-Ray-Log der geophysikalischen Bohrlochvermessung lithologisch und sedimentologisch zu interpretieren, ist es von Vorteil, eine Eichung am Kernmaterial durchzuführen. Als Standardprofil diente die Bohrung Remlingen 7. Zusätzlich zu den Schlumberger-Messungen im Bohrloch wurde an den Bohrkernen die natürliche Gammastrahlung gemessen. Die gemessene Kurve wurde mit der Schlumberger-Messung korreliert und einzelne Strahlungsspitzen (Peaks) bzw. Gruppen von Strahlungsspitzen ausgehalten.

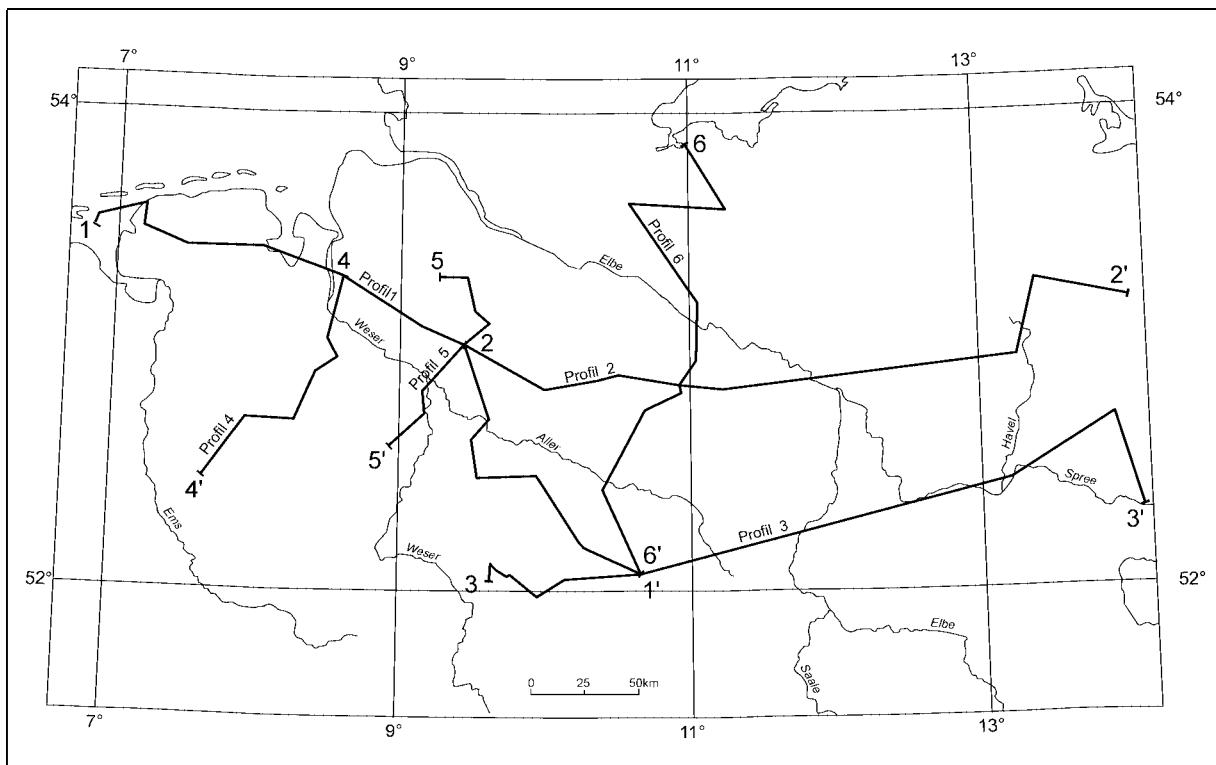


Abb. 4: Korrelationsprofile innerhalb des Norddeutschen Beckens

Ausgehend von der Bohrung Remlingen 7 wurden die Gamma-Ray- und Sonic-Logs der ausgewählten Bohrungen (Kriterien siehe Kap. 3.1.1) im Norddeutschen Becken im Ringschluss korreliert. Die Bohrungen liegen meist einige Zehnerkilometer voneinander entfernt. Zur regionalen Korrelation wurden sechs Korrelationsprofile, möglichst senkrecht und parallel zur Beckenachse des Norddeutschen Beckens, ausgewählt (Abb. 6). Diese Korrelationsketten verlaufen in NW-SE-, W-E- bzw. N-S-Richtung.

Die Korrelation erfolgte visuell durch Logvergleich. Ein steiles Einfallen des Schichtpaketes wurde durch Stauchung der einzelnen Kurven korrigiert. Es wurde versucht, die im Gamma-Ray- und Sonic-Log der Bohrung Remlingen 7 erkannten Logspitzen bzw. Logbilder in den Bohrlochmesskurven anderer Bohrungen wiederzufinden, diese regional zu verfolgen sowie Abweichungen zu erkennen. Anhand von Veränderungen im Logbild erlauben die Profilketten, vorhandene Schichtausfälle, Mächtigkeitsveränderungen und laterale Fazieswechsel sowie lithologische Veränderungen aufzuzeigen. Änderungen in der Gesteinszusammensetzung spiegeln sich direkt im Kurvenverlauf der verschiedenen Messungen wider.

3.4 Geochemische Analyse

Geochemische Parameter können in Kombination mit lithologischen, sedimentologischen, biostratigraphischen und mikrofaziellen Untersuchungen Ergänzungen zu stratigraphischen und faziellen Gliederungen liefern. In den letzten Jahren wurden chemische Elementanalysen vermehrt zu stratigraphischen Korrelationen insbesondere kontinentaler Sequenzen herangezogen. Hier sind u. a. die Arbeiten von PEARCE & JARVIS (1995), PEARCE et al. (1997) oder RACEY et al. (1995) zu nennen, die in quartären distalen Turbiditen des Nordostatlantik, im Westfal C/D der West-Midlands (U.K.) und der lithologisch schwer gliederbaren Skaggerak-Fomation (Untere Trias) der zentralen Nordsee erfolgreich eingesetzt worden sind. Die dort durchgeführten „chemostratigraphischen“ Interpretationen erfolgten dabei auf der Grundlage anorganisch-geochemischer Daten. Als Methoden wurden die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und die optische Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) eingesetzt. Mit Hilfe einer detaillierten geochemischen Analyse lassen sich Gesteinsabfolgen geochemisch charakterisieren, untergliedern und auch korrelieren. Insbesondere in monotonen Gesteinspaketen, die sich auf der Basis der o. g. Methoden der Litho- und Biostratigraphie nicht oder nur gering gliedern lassen, stellt die „Chemostratigraphie“ ein zusätzliches, nützliches Werkzeug dar. Dies war Anlass, die nachfolgend beschriebenen geochemischen Untersuchungsmethoden im biostratigraphisch kaum gliederbaren Mittleren Muschelkalk einzusetzen.

3.4.1 Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)

Für die quantitative Bestimmung der Element-Gesamtgehalte, zur Bestimmung des geochemischen Verteilungsmusters sowie zur Klassifizierung der Sedimente wurde die Röntgenfluoreszenz-Analyse eingesetzt, da dieses Verfahren unabhängig von der chemischen Löslichkeit der verschiedenen Mineralbestandteile einer Probe arbeitet und es sich hierbei um eine Multielementanalyse handelt. Die Proben wurden in Form von Schmelztabletten analysiert, um eine homogene Elementverteilung sicherzustellen. Es wurden die Konzentrationen von 11 Hauptelementen (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 und Sulfatschwefel als SO_3) und 30 Spurenelementen (As, Ba, Bi, Ce, Cl, Co, Cr, Cs, Cu, F, Ga, Hf, La, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sb, Sc, Sn, Sr, Ta, Th, U, V, W, Y, Zn, Zr) jeder Probe sequentiell bestimmt.

Die Untersuchungen wurden mit einem wellendispersiven Röntgenspektrometer der Firma Philips durchgeführt. Die Analysen erfolgten mit dem Gerät PW 1480, das mit einer Chromanode, und dem Gerät PW 2400, das mit einer Rhodiumanode ausgestattet ist. Für beide Sequenzspektrometer sind

Programme der Messabläufe und Messparameter in der BGR erarbeitet und optimiert worden. Zur Matrixkorrektur wurde das mathematische Modell nach DE JONGH (1976, Philipsmodell) herangezogen. Die Kalibrierung der Geräte erfolgte mit international zertifizierten Referenzproben. Zur Kontrolle des analytischen Verfahrens wurden internationale und BGR/NLfB-eigene Standardproben in die Analytik mit einbezogen. Die Genauigkeiten (Reproduzierbarkeiten) werden mit $\pm 0,5\%$ für die Hauptelemente und mit max. $\pm 10\%$ für die Spurenelemente angegeben (STUMMEYER pers. Mitt.).

Die pulverfein gemahlenen Proben wurden bei 1200 °C 20 Minuten aufgeschlossen (1 g Probe + 5 g Borat); die erhaltenen Schmelzen („Schmelztabletten“) wurden direkt für die Schmelzen verwandt. Zuvor wurden die Proben bei 1030 °C für 15 min geglüht, um flüchtige Bestandteile freizusetzen und der Glühverlust (LOI, loss on ignition, Glühverlust) ermittelt. Da das Schmelzverfahren für Salzproben nicht geeignet ist, wurden von diesen Proben Presstabletten hergestellt und an ihnen die Konzentrationen der Elemente Brom, Rubidium und Strontium bestimmt.

Die SO₃-, Cl-, F- und As-Gehalte sind nur als halbquantitative Analysenergebnisse aufzufassen, da beim Schmelzvorgang einige Schwefel-, Chlor-, Fluor- und Arsen-Verbindungen umgewandelt und unterschiedliche Anteile dieser Elemente flüchtig werden.

3.4.2 Optische Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)

Bisherige Spurenelementanalysen von Karbonaten erfolgten meist mit Hilfe der Atomabsorptions-Spektrometrie (AAS; u. a. JOACHIMSKI 1991, LANGBEIN & STEPANSKI 1996). Ein Vorteil der ICP-Emissionsspektrometrie ist jedoch darin zu sehen, dass es sich bei dieser Methode um eine Multielement-Analyse handelt, die auf Grund ihrer Anregungsquelle erheblich geringere Matrixeffekte als die Atomabsorptions-Spektrometrie aufweist und vergleichbare Nachweisgrenzen erzielt.

Zur Bestimmung der an die Karbonatminerale gebundenen Elemente (Sr, Fe, Mn, Na) wurden 500 mg des Probenmaterials mit 10 ml 1 mol HCl versetzt. Die Einwirkzeit betrug bei Raumtemperatur 2 h, wobei die Probe einmal geschüttelt wurde. Über vorher getrocknete und gewogene Papierfilter wurde der unlösliche Probenrückstand abfiltriert und 2 mal mit 5 ml dest. H₂O gewaschen. Zur Bestimmung des unlöslichen Rückstands wurden die Filter bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und dann gewogen. Die Elementbestimmung in den Lösungen erfolgte mittels ICP-OES Analyse mit einem Gerät der Firma JOBIN-YVON Typ JY 166 Ultratrace.

Bei der Analyse wurden interne Laborstandards ebenfalls aufgeschlossen. Die relative Standardabweichung der Analysenwerte wurde aus diesen Standards ermittelt und liegt bei max. $\pm 5\%$.

Auf eine eigene Bestimmung der Nachweisgrenzen wurde verzichtet, da vor jedem Messgang eine Optimierung der Geräteeinstellung erfolgte und die Elementkonzentrationen in den Messlösungen in allen Fällen um ein Vielfaches höher als die Nachweisgrenzen waren.

Die Interpretation der an die Karbonatminerale gebundenen Spurenelemente wird durch eine Kontamination mit Spurenelementen, die an den nichtkarbonatischen Rückstand (Anhydrit, Tonminerale, Oxide, Hydroxide usw.) gebunden sind, erschwert. Allgemein wird jedoch davon ausgegangen, dass nur ein geringer, vernachlässigbarer Teil des nichtkarbonatischen Rückstands in Lösung geht (JOACHIMSKI 1991). Zur Interpretation wurden nur solche Proben ausgewählt, bei denen die Differenz zwischen dem experimentell bestimmten unlöslichen Rückstand und dem aus den Ergebnissen der RFA errechneten Gehalt an unlöslichen Rückstand und Anhydrit (Kap. 3.5) weniger als 5 % betrug.

3.4.3 Röntgendiffraktometrie

Die Röntgendiffraktometrie wurde zur halbquantitativen Bestimmung des Mineralbestands und der Bestimmung der Stöchiometrie des Dolomits herangezogen. Die Untersuchungen erfolgten mit einem Siemens D50-Röntgendiffraktometer ($\text{CuK}\alpha$ -Strahlung, 40 kV, 30 mA, Graphit Monochromator). Der Gehalt an CaCO_3 im Dolomit lässt sich aus der Verschiebung des 104-Dolomitreflexes bestimmen (GOLDSMITH & GRAF 1958). Ein erhöhter Ca-Gehalt im Dolomitgitter verschiebt den 20-Wert des (104)-Peaks zu niedrigeren Winkeln hin, d.h. der d-Wert erhöht sich. Dabei darf eine lineare $d(104)$ -Verlagerung zwischen dem Calcit-Hauptreflex ($d(104) = 3,035 \text{ \AA}$) und dem Dolomit-Hauptreflex ($d(104) = 2,886 \text{ \AA}$) angenommen werden (GOLDSMITH et al. 1961, RICHTER 1984). Die Hauptreflex-Lagen wurden nach dem inneren Quarz-Standard korrigiert.

3.5 Halbquantitative Bestimmung des Mineralbestands

Eine halbquantitative Abschätzung des Mineralbestands erfolgte mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie. Dabei handelt es sich bei der Klassifizierung in Hauptkomponenten (> 25 Gew.-%), Nebenkomponenten (10 - 25 Gew.-%) und Spuren (< 10 Gew.-%) um empirische Abschätzungen. Unter Berücksichtigung der röntgendiffraktometrischen Zusammensetzung erfolgte mit den Ergebnissen der Röntgenfluoreszenzanalyse eine halbquantitative Ermittlung der Mineralzusammensetzung der untersuchten Proben (Abb. 7). Ermittelt wurden die Hauptminerale Calcit, Dolomit, Anhydrit, Halit, Coelestin sowie eine vor allem aus Quarz, Tonmineralen und Feldspat bestehende Restphase. Diese silikatische Restphase wird im Folgenden als unlöslicher Rückstand (insoluble residue, IR) bezeichnet. Auf umfangreiche tonmineralogische Untersuchungen wurde verzichtet, da vorangegangene Untersuchungen (LIPPmann & PANKAU 1988) gezeigt haben, dass mit Hilfe dieser Methode eine über die hier vorgelegte Feingliederung hinausgehende stratigraphische Untergliederung nicht möglich erscheint. So wurde von LIPPmann & PANKAU (1988) Illit und Clorit über die gesamte Schichtenfolge des Mittleren Muschelkalks nachgewiesen. Corrensit kommt außer im basalen Abschnitt ebenfalls in allen von ihnen untersuchten Proben vor.

In die Berechnungen des Anhydrit- und Halitgehalts sind die mittels RFA bestimmten Gehalte an SO_3 und Cl eingegangen. Diese Werte stellen jedoch, wie bereits in Kapitel 3.4.1 erwähnt, halbquantitative Analysenergebnisse dar. Es wird davon ausgegangen, dass Dolomit die Karbonatphase des Mittleren Muschelkalks bildet, so dass der Dolomitgehalt zum einen aus dem MgO -Gehalt (Dolomit 2) und zum anderen aus dem CaO -Gehalt abzüglich des anhydritisch gebundenen CaO (Dolomit 1) errechnet werden kann. Ist der berechnete Dolomit 1-Gehalt jedoch größer als der Dolomit 2-Gehalt wird dies als Hinweis auf das Vorhandensein von Calcit gewertet. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen haben gezeigt, dass MgO ebenfalls an Chlorit gebunden sein kann. Chlorit wurde auch röntgenographisch nachgewiesen. Für die nachfolgenden Berechnungen wurde daher die Annahme getroffen, dass bis zu 0,5 % MgO in den Chlorit eingehen. Der Dolomit-Gehalt berechnet sich somit aus dem bei der RFA bestimmten MgO -Gehalt abzüglich des chloritisch gebundenen MgO (Dolomit 3), der Calcit-Gehaltes aus dem bei der RFA ermittelten CaO abzüglich des an Anhydrit und Dolomit gebundenen CaO .

Die mit den gewonnenen Werten berechneten Mineralgehalte sind als halbquantitative Ergebnisse aufzufassen. Die Ergebnisse der Berechnungen (s. Tab. 12) werden daher auf ganze Prozentzahlen gerundet angegeben.

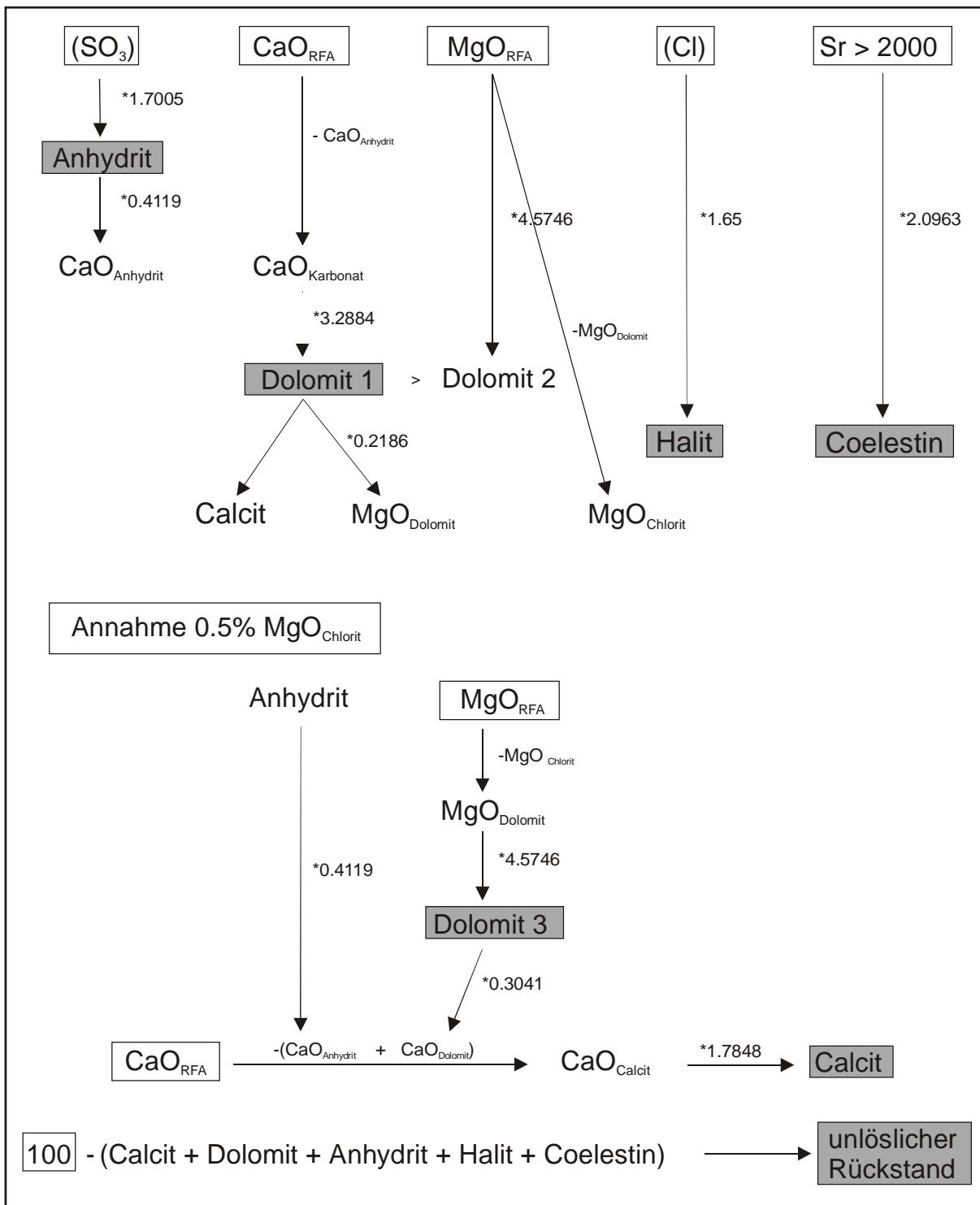


Abb. 5: Berechnung der Hauptmineralzusammensetzung

3.6 Statistische Auswertung des Datenmaterials

Moderne Multi-Element-Analysetechniken gestatten es, innerhalb kurzer Zeit umfangreiche Datensätze zu erzeugen. Mit Hilfe multivariater statistischer Methoden können aus einem Datensatz Erkenntnisse verallgemeinernder Art gewonnen werden. Dabei werden die Beziehungen zwischen zwei und mehreren Merkmalen betrachtet und quantifiziert. Ziel ist es, einerseits kausale Beziehungen zwischen den einzelnen Merkmalen (Variablen) bzw. Proben aufzudecken, andererseits redundante Informationen zu erkennen und durch ihre Eliminierung den Merkmalsumfang zu reduzieren.

Zur Auswertung der Daten stand das Programm SPSS zur Verfügung. Die statistische Auswertung wurde mit folgenden Methoden durchgeführt:

- Methoden der deskriptiven Statistik u. a. zur Ermittlung von Minimal-, Maximal-, Median-, Mittelwert und Standardabweichung,
- Korrelationsanalyse mit dem Ziel, durch paarweise Variablenvergleiche die Beziehungen der Variablen miteinander zu untersuchen und graphisch darzustellen. Dabei gibt der Korrelationskoeffizient r die Stärke der Korrelation der beiden verglichenen Variablen an,
- Clusteranalyse mit dem Ziel, den Datensatz in homogene Klassen (Cluster) zu unterteilen, innerhalb derer alle Objekte ähnliche Variablenmuster aufweisen, während sich die Muster von Objekten verschiedener Klassen deutlich unterscheiden.

In die statistische Auswertung wurden nur die Elemente einbezogen, bei denen mehr als 70 % der Messwerte oberhalb der Nachweisgrenze lagen. Elementgehalte unterhalb der Nachweisgrenze wurden in den Auswertungen der RFA-Analyse als kleiner-als-Werte angegeben. Definitionsgemäß ist die Nachweisgrenze die Konzentration, bei der der Nachweis in 50 % aller Fälle gelingt. Für Messwerte unterhalb der Nachweisgrenze, kann die Anwesenheit nicht mehr mit ausreichender Sicherheit festgestellt werden, da es sich ebenso um Leerwerte (Blindwerte) handeln kann.

Statistische Auswertungen sind jedoch nur bei numerischen Angaben möglich. Für die statistischen Berechnungen wurden die Elementkonzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze durch den halben Wert der Nachweisgrenze ersetzt. Alle Analysenwerte oberhalb der Nachweisgrenze gehen mit ihrem ermittelten Messwert in die Statistik ein. Diese Methode findet in chemischen Laboratorien bei statistischen Auswertungen seit langem ihre Anwendung und ist durch das Deutsche Informationszentrum für technische Regeln (DITR) im Deutschen Institut für Normung e.V. (DIN) anerkannt (Schreiben vom 20.09.2001 an das Chemische Untersuchungsamt der Stadt Bochum).

Eine Voraussetzung für die Anwendung der statistischen Methoden ist, dass die Daten einer GAUSS'schen Normalverteilung angenähert sind, d.h. normalverteilt sind. War diese Voraussetzung nicht erfüllt, so wurden die Daten transformiert ($x_i \rightarrow \log x_i$), und die dabei entstandene Verteilung auf Normalverteilung geprüft (log-normal-Verteilung).

Im Anschluss daran wurden die Daten standardisiert. Eine Standardisierung (z-Transformation) hat eine Gleichwertigkeit und direkte Vergleichbarkeit aller Merkmale zum Ziel. Die z-Transformation eines Variablenwertes berechnet sich als Differenz zwischen dem Variablenwert x_i und dem Mittelwert \bar{x} der Verteilung, dividiert durch die Standardabweichung s :

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s}$$

Dabei ergibt sich ein standardisierter Mittelwert $x_z = 0$ und eine Standardabweichung $s_z = 1$. So können letztendlich auch Variablen mit verschiedenen Spannweiten oder Größenordnungen (z. B. % und ppm) verglichen werden (BÜHL & ZÖFEL 1995).

Das Softwarepaket SPSS bietet verschiedene Verfahren, die zur Unterteilung der Daten in Cluster führen. Zur Anwendung kamen die hierarchische Clusteranalyse der Elemente mit dem Ward-Verschmelzungs-Algorithmus sowie eine Clusterzentrenanalyse der Proben. Als Ähnlichkeitsmaß wurde die quadrierte euklidische Distanz gewählt. Je kleiner die quadrierte euklidische Distanz ist, desto ähnlicher sind sich die Objekte.

Während bei der Clusterzentrenanalyse die zu ermittelnde Clusterzahl vorgegeben werden muss und die optimale Aufteilung der Datenmenge entsprechend dieser Zahl vorgenommen wird, wird bei der hierarchischen Clusteranalyse die optimale Clusterzahl bestimmt. Dabei bildet jedes Element zu Beginn sein eigenes Cluster. Die beiden Cluster mit der größten Ähnlichkeit werden zu einem neuen Cluster zusammengefasst. Dieses Verfahren wird solange fortgesetzt, bis nur noch zwei Cluster übrigbleiben. Das Ergebnis wird in Form eines Stammbaums abgebildet. Dabei wird die Anordnung im Stammbaum nicht nur zur qualitativen Illustration der erzeugten Objekthierarchie verwendet, sondern auch zur quantitativen Bewertung dieser Hierarchie: die Höhe des Zusammenfassungsniveaus zweier Gruppierungen im Stammbaum kann als Maß ihrer Unähnlichkeit interpretiert werden.

Somit werden sowohl bei der hierarchischen Clusteranalyse als auch bei der Clusterzentrenanalyse anhand von ausgewählten Merkmalen relativ homogene Gruppen von Fällen (Proben) und Variablen (Elementen) identifiziert, die das geochemische Verteilungsmuster innerhalb des Mittleren Muschelkalks kennzeichnen.

3.7 Mikrofazies

Mikrofazielle Untersuchungen erfolgten an Karbonaten und Anhydriten. Insgesamt wurden 110 Dünnschliffe mit einer Dicke von ca. 30 µm untersucht. Dabei richtete sich die Auswahl der Dünnschliffproben nach lithologischen Gesichtspunkten. Es wurde versucht, die makroskopisch erkannten Lithotypen anhand von ausgewählten Dünnschliffen zu dokumentieren. Vor dem Abdecken wurden diese zur Unterscheidung von Calcit und Dolomit sowie zur Abschätzung des Fe-Gehaltes halbseitig mit Kaliumferricyanid und Alizerin Rot S angefärbt (FÜCHTBAUER 1988).

Die Klassifikation der Karbonate erfolgte nach FOLK (1959), DUNHAM (1962), und WRIGHT (1992), die der Anhydrite nach MAIKLEM et al. (1969). Für mikroskopische Beschreibungen wurden weitere Arbeiten von BALZER (1997), CAROZZI (1993) und LANGBEIN (1979) herangezogen. Die Salzklassifikation lehnt sich an die Nomenklatur von WIDMER (1991) an.

3.8 Palynologie

Innerhalb des marinen Muschelkalks werden biostratigraphische Aussagen vorwiegend mit Makro- und Mikrofossilien, Ceratiten sowie Conodonten und Ostracoden durchgeführt. Für den salinaren Mittleren Muschelkalk ist dies jedoch nicht möglich. Hier existieren als verlässliche Zeit- und Klimazeugen lediglich Sporen und Pollen sowie lebende Phytoplankton und seine Zysten. Aus der mengenmäßigen Verteilung der Palynomorphen lassen sich neben stratigraphischen Aussagen auch Rückschlüsse auf das Ablagerungsmilieu wie Fazies oder paläokologische Verhältnisse der untersuchten Schichtenfolgen ableiten. Die Palynologie bietet somit neben den logstratigraphischen, lithologisch-faziellen und geochemischen Untersuchungen eine weitere Basis für die fazielle und sequenzstratigraphische Interpretation.

Die hier vorgestellten palynologischen Untersuchungen wurden im Rahmen des von der Verfasserin bearbeiteten DFG-Projektes (BRÜCKNER-RÖHLING 1999) begonnen. Die Bestimmung und Auszählung der palynologischen Taxa führte freundlicherweise Dr. Carmen HEUNISCH (NLfB) durch. Eine ausführliche Bewertung und Interpretation der palynologischen Bestimmungen erfolgte jedoch erst

nach Abschluss des o. g. DFG-Projektes durch die Verfasserin im Rahmen der hier vorgelegten Dissertation.

Palynologisch untersucht wurden 59 Proben von Dolomiten, Ton- und Tonmergelsteinen, Anhydriten und Steinsalzen aus dem höchsten Unteren, dem Mittleren und dem Oberen Muschelkalk (Tab. 9). Neben der Erfassung der vorhandenen Taxa zur stratigraphischen Einordnung erfolgte eine quantitative Auswertung aller Proben. Dazu wurden, soweit möglich, 250 Palynomorphen pro Probe ausgezählt und die Palynomorphen in Großgruppen sowie morphologische Gruppen, die den einzelnen Großgruppen zugeordnet werden, zusammengefaßt (HEUNISCH 1997, 1998). Die Aufbereitung der Proben richtete sich nach der Standardmethode „Palynologie“, d.h. 20 g des Probenmaterials, bei Anhydriten 40 g, wurden in HCl und HF gelöst, mit Ultraschall (10 µm) gesiebt und Streupräparate in Glyzeringelatine angefertigt.

4 LITHOSTRATIGRAPHIE UND REGIONALE DIFFERENZIERUNG

4.1 Grenzbereich Unterer/Mittlerer Muschelkalk

Die Flachwasserkarbonate des Unteren Muschelkalks (mu) entstanden auf einer flachen Karbonatrampe. In Abhängigkeit von Wassertiefe und -energie kamen eine Reihe von Sedimenttypen, die sich küstenparallel anordneten, zur Ablagerung. Randlichen lagunären Karbonatschlämme und Peloidsanden sind beckenwärts Ooid- und bioklastische Karbonatsandflächen vorgelagert. Im etwas tieferen Bereich der Rampe sedimentierten Karbonatschlämme und bioklastische Karbonatschlämme. Faziell dominieren im Unteren Muschelkalk nieder-energetische, dünn geschichtete mergelige Kalksteine (Wellenkalk), denen einzelne hoch-energetische Kalksteinbänke, die als mehr oder weniger kurzzeitige Ereignisse gedeutet werden, eingeschaltet sind.

Der Untere Muschelkalk wird mit Hilfe von Leitbänken lithostratigraphisch gegliedert. Im nördlichen Bereich des Mitteleuropäischen Beckens (niedersächsisch-ostwestfälisches und mitteldeutsches Bergland) bis nach Unterfranken sind dies die Oolithbänke, die Terebratelbänke und die Schaumkalkbänke. STEIN (1968) konnte im Unteren Muschelkalk Südniedersachsens 20 Leithorizonte nachweisen.

Der Bereich der Oolithbänke untergliedert sich im Norddeutschen Becken in die untere und die obere Oolithbank, die ein Wellenkalkzwischenmittel einschließen. Die obere Oolithbank in Mitteldeutschland zeigt zudem eine deutliche Zweiteilung. Die lithologische Ausbildung ist nicht einheitlich. Charakteristisch sind Gelbkalke innerhalb des Zwischenmittels, die sich vom Osnabrücker Bergland im W und Rüdersdorf im E bis nach N-Hessen nachweisen lassen. Südlich davon ist die deutliche Zweigliederung der Oolithbänke nicht mehr festzustellen – nur eine Oolithbank ist ausgebildet. Es ist jedoch unklar, welche der beiden Oolithbänke sich nach Süden fortsetzt. Vom Tauberland nach Süden kommt es infolge Dolomitisierung und Einschaltung mächtiger Tonmergelsteinpakete im tieferen Unteren Muschelkalk zu einer starken faziellen Differenzierung. Die Oolithbänke lassen sich in diesem Bereich nicht mehr nachweisen (HAGDORN et al. 1987). Eine charakteristische Fazieseinheit im süddeutschen Unteren Muschelkalk bilden die *buchi*-Mergel, die in Unterfranken in Wellenkalke übergehen. Im Gebiet östlich der Elbe ist der Untere Muschelkalk oberhalb der Oolithbänke regional als Ooidkalk ausgebildet (Rüdersdorfer Schaumkalk).

Der Bereich der Terebratelbänke ist von Ostwestfalen, über die Scholle von Calvörde, sowie Südniedersachsen und Thüringen bis ins Tauberland zu verfolgen und wird von einer mächtigen Unteren Terebratelbank, einem Wellenkalk-Zwischenmittel und einer Oberen Terebratelbank aufgebaut. Im Bereich des Osnabrücker Berglandes wird eine Schillkalkbank, die z. T. in mehrere kleine Bänkchen aufspaltet, als Vertretung des Bereichs der Terebratelbänke angesehen. Gegen das Bauland keilen die Terebratelbänke aus und sind in Hohenlohe bisher nicht nachgewiesen. Die lithologische Ausbildung der Terebratelbänke variiert in den einzelnen Gebieten des Mitteleuropäischen Beckens, charakteristisch ist jedoch das häufige Vorkommen von *Coenothyris vulgaris*.

Die Schaumkalkbänke stellen die oberste Leitbankfolge innerhalb des Unteren Muschelkalks dar. Dieser Bereich umfasst drei durch Wellenkalkzwischenmittel getrennte oolithisch-poröse, häufig intraklastreiche Schillkalksteinbänke. Mächtigkeiten und Fazies unterliegen starken Schwankungen, im allgemeinen verlieren sie von unten nach oben an Mächtigkeit. In Südniedersachsen, Thüringen und Hessen werden sie als Untere, Mittlere und Obere Schaumkalkbank bezeichnet. Im Osnabrücker Bergland hingegen ist eine Identifizierung des Bereichs der Schaumkalkbänke nicht möglich. Hier kamen innerhalb des Wellenkalk 3 und im Bereich der Schaumkalkbänke insgesamt ebenschichtige Kalksteine („Plattenkalke“) mit nach oben zunehmender Gelbfärbung zur Ablagerung (GROETZNER 1984). In

Unterfranken unterscheidet man zwischen den Schaumkalkbänken 1, 2 und 3 und im Taubergebiet sowie in Nordost-Baden-Württemberg zwischen Unterer und Oberer Schaumkalkbank. In Hohenlohe spaltet sich die Obere Schaumkalkbank in mehrere oolithfreie Schillbänkchen mit Mergel- und Wellenkalkzwischenlagen auf (HAGDORN et al. 1987). Weiter nach Süden sind die Schaumkalkbänke nicht mehr nachzuweisen. Lediglich in Elsass-Lothringen sind sie wieder anzutreffen (SCHWARZ 1970).

Oberhalb des Bereichs der Schaumkalkbänke folgen die *orbicularis*-Schichten. Ihr Name wird von dem häufigen Auftreten der Muschel *Neoschizodus orbicularis* abgeleitet. Die *orbicularis*-Schichten können als Übergangsfolge vom marinen Unteren Muschelkalk zum salinaren Mittleren Muschelkalk angesehen werden, wobei dieser Bereich von SIMON (1982) in Süddeutschland bereits als Salinarzyklus gedeutet wird. Gegenüber dem Bereich der Schaumkalkbänke, der noch durch eine arten- und individuenreiche Fauna gekennzeichnet ist, ist die Fauna in den *orbicularis*-Schichten stark verarmt. Sie besteht fast ausschließlich aus *Neoschizodus orbicularis* und *Bakevellaia costata*. Lithologisch werden die *orbicularis*-Schichten von Dolomiten und dolomitischen, oft plattigen Mergelsteinen aufgebaut. Bioturbation wird im unteren Teil beobachtet, weiterhin charakteristisch sind Anhydrit/Gips-Knollen im cm-Bereich. In Süddeutschland treten im Bereich der *orbicularis*-Schichten bis zu ca. 1 m mächtige Sulfatlagen auf.

Biostratigraphisch werden der Bereich der Schaumkalkbänke und die *orbicularis*-Schichten der Assamblage-Zone mit *Neoschizodus orbicularis* und *Judicarites* zugeordnet (KOZUR 1974).

In der Literatur besteht bisher keine einheitliche Auffassung zur Grenze Unterer/Mittlerer Muschelkalk (Tab. 4). Die meisten Autoren rechnen die *orbicularis*-Schichten zum Unteren Muschelkalk (u. a. WAGNER 1897, VOLLRATH 1923, SCHACHL 1954, SCHRÖDER 1964, SCHULZE 1964, MORGENROTH 1971, FARRENSCHON 1986, 1990, MAQSUD 1986, DRONKERT 1987, HAGDORN et al. 1987, FRIEDEL 1988, DRONKERT et al. 1990, DÜNKEL & VATH 1990, FRIEDEL & SCHWEIZER 1991, WIDMER 1991, DÜNKEL 1992, HAUBER 1993). Daraus ist ersichtlich, dass die Obergrenze des Unteren Muschelkalks in den Gebieten Südniedersachsen, Hessen, Franken, und Baden-Württemberg oberhalb der *orbicularis*-Schichten gezogen wird. Davon abweichend forderte lediglich GENSER (1930) für Unterfranken sowie STEIN (1968) für Südniedersachsen, die *orbicularis*-Schichten dem Mittleren Muschelkalk zuzurechnen.

In Anlehnung an WILD (1968) schlug SIMON (1982) für Süddeutschland vor, die Grenze Unterer/Mittlerer Muschelkalk an die Oberkante einer Sulfatbank in den *orbicularis*-Schichten zu legen.

Da die *orbicularis*-Schichten in Mitteldeutschland einschließlich Thüringen, im Osnabrücker Bergland und Osning z. T. keine deutliche Abgrenzung zu den darüber folgenden Unteren Dolomiten des Mittleren Muschelkalks haben, wird die Grenze zum Mittleren Muschelkalk in diesem Gebieten von den meisten Autoren an die Oberkante der Oberen Schaumkalkbank gelegt (u. a. SEIDEL 1965, RADZINSKI 1971, SCHWAHN & GAHRMANN 1976, ALTHEN et al. 1980, GROETZNER 1984, LANGER 1989, ROSENFELD & THIELE 1992, ERNST 1993, BRÜCKNER-RÖHLING & LANGBEIN 1993). In West- und Südtüringen, Hessen und Unterfranken wird das Hangende der *orbicularis*-Schichten durch die oolithisch-konglomeratische Grenzbank belegt. Mit einer Mächtigkeit von allgemein 20 cm ist sie jedoch nur in guten Aufschlüssen auffindbar, in Unterfranken keilt sie immer wieder aus. Im Tauberland bis ins südliche Hohenlohe entspricht die konglomeratische Grenzbank möglicherweise der Geislinger Bank (HAGDORN et al. 1987).

Mit dem Beschluss der Subkommission Perm - Trias der Stratigraphischen Kommission der DUGW (Protokoll der Sitzung 19. Juli 1997 in Gotha) wurde eine einheitliche Grenzziehung Unterer/Mittlerer Muschelkalk geschaffen. Die Hangengrenze des Unteren Muschelkalks wird an die Oberkante der Oberen Schaumkalkbank gelegt, die *orbicularis*-Schichten werden dem Mittleren Muschelkalk zugerechnet und mit den Unteren Dolomiten des Mittleren Muschelkalks zur Karlstadt-For-

mation zusammengefasst. Für den Unterer Muschelkalk des zentralen Norddeutschen Beckens wird der Begriff der Jena-Formation eingeführt. Zusätzlich werden in Süddeutschland an den Beckenrändern die dolomitische Freudenstadt-Formation im Südwesten, die klastische Udelfangen-Formation entlang des westlichen Beckenrandes und die Eschenbach-Formation im Osten definiert. Am östlichen Beckenrand des Norddeutschen Beckens wird der Untere Muschelkalk in die Jena-Formation und die Rüdersdorf-Formation untergliedert (HAGDORN et al. 1998).

4.2 Mittlerer Muschelkalk

Der Mittlere Muschelkalk repräsentiert die Salinarfazies innerhalb des Muschelkalks des Mitteleuropäischen Beckens, es kamen vorwiegend lagunäre und inter- bis supratidale Sedimente zur Ablagerung. Die Gliederung erfolgt im Allgemeinen nach lithofaziellen Gesichtspunkten und unterscheidet sich regional (Tab. 4).

In Nordwestdeutschland wurde der Mittlere Muschelkalk nach WOLBURG (1969) und TRUSHEIM (1971) in eine Liegende Salinarserie (mm1) und eine Dolomit-Mergel-Serie (mm2) untergliedert. GAERTNER & RÖHLING (1993) unterteilten den Mittleren Muschelkalk in Nordwestdeutschland in Untere Dolomitmergel, Muschelkalk-Salinar und Obere Dolomitmergel.

SCHULZE (1964) differenzierte den Mittleren Muschelkalk auf der Scholle von Calvörde in sechs Dolomit- und fünf Anhydrithorizonte. Diese Gliederung wurde von weiteren Autoren immer wieder aufgegriffen (ALTHEN et al. 1980, BEUTLER 1993, BRÜCKNER-RÖHLING & LANGBEIN 1993) und erfolgreich auf den Mittleren Muschelkalk Nordostdeutschlands angewendet.

Der Mittlere Muschelkalk im östlichen Subherzyn wurde von SCHWAHN & GAHRMANN (1974) nach zyklischen Gesichtspunkten in mm1 - mm3 untergliedert, wobei Unteres Karbonat und Untere Residualbildungen den mm1, Mittleres Karbonat und Obere Residualbildungen den mm2 und Oberes Karbonat den mm3 aufbauen.

In Thüringen wird der Mittlere Muschelkalk generell in Unterer Dolomit, Untere Wechsellagerung, Unteres Sulfat, Steinsalz, Oberes Sulfat, Mittlere Wechsellagerung, Mittlerer Dolomit, Obere Wechsellagerung und Oberer Dolomit untergliedert (SEIDEL 1965). In Bereichen mit subdiertem Steinsalz wird Unteres und Oberes Sulfat zusammengefasst. Abweichend von dieser Gliederung unterteilt MERZ (1987) den Mittleren Muschelkalk in 5 Einheiten (mm1 - mm5). Der mm2 nach MERZ umfasst dabei den Bereich Untere Wechsellagerung bis Mittlere Wechsellagerung der SEIDELSchen Gliederung. Für den Bereich der Querfurter Mulde gliederte RADZINSKI (1971) den Mittleren Muschelkalk an Hand von Kernbohrungen in ein Unteres Karbonat, Untere Rückstandsbildungen, Mittleres Karbonat, Obere Rückstandsbildungen und Oberes Karbonat.

In Hessen und Nordrhein-Westfalen wird der Mittlere Muschelkalk dreigeteilt. BUSSE & HORN (1982) sowie FARRENSCHON (1986, 1990) halten eine Untere Mergel-Dolomit-Folge, eine Gips-Tonstein-Folge und eine Obere Mergel-Dolomit-Folge aus. BACKHAUS (1969) bezeichnet in der Vorderrhön den mm1 als Untere Mergel (Dolomite), den mm2 als Äquivalente des Salinars als Zellenkalke bzw. -dolomite und Dolomitmergel mit Dolomiten, und den mm3 als Obere Mergel.

Für Südniedersachsen wird von DÜNKEL & VATH (1990) in Anlehnung an die thüringische Gliederung eine Unterteilung in fünf Folgen, Unterer Dolomit, Unteres Sulfat (Untere Residualbildung), Mittlerer Dolomit, Obere Residualbildung und Oberer Dolomit vorgeschlagen. DÜNKEL (1992) dagegen unterteilt die Schichtenfolge in mm1 - mm7, wobei er die Unteren Residualbildungen in nicht subrosiv beeinflussten Profilen in Basissulfat (mm2), Steinsalz (mm3) und Unteres Sulfat (mm4) unterteilt.

In Baden-Württemberg lässt sich außerhalb der Steinsalzfazies der Mittlere Muschelkalk in sieben lithofazielle Einheiten (mm1 - mm7) untergliedern. Dies sind Unterer Dolomit, Basissulfat, Unterer Residualton, Unteres Sulfat, Mittlerer Dolomit, Oberes Sulfat und Oberer Dolomit (FRIEDEL 1988). Sind Basissulfat und Unteres Sulfat subordnet, wird der Bereich des mm2 - mm4 als Residualton ausgehalten. Für die Steinsalzregionen schlägt SIMON (1988) die Unterteilung in Basisschichten, Untere Dolomite, Grundanhidrit, Salzlager mit Unterem Salz, Bändersalz, Oberes Salz und Übergangszone, Anhydritregion und Obere Dolomitregion vor.

In Nordbayern wird der Mittlere Muschelkalk in salinärer und gering salinärer Fazies sowie in dolomitischer und sandiger Randfazies angetroffen. Die Salinarfazies wird unterteilt in mm1 (Unterer Dolomit, Basis-Sulfat, Unteres Steinsalzlager, Unteres Sulfat mit Oberem Steinsalzlager), mm2 (Mittlerer Dolomit mit Oolith, Oberes Sulfat) und mm3 (Oberer Dolomit). Im geringer salinaren Faziesbereich entsprechen dem mm1 die basalen dolomitischen Kalksteine, Residualtone und -mergel, dem mm2 der Mittlere Zellenkalkstein oder der Oolith und Residualtone und -mergel sowie dem mm3 der Stylolithenkalkstein, die Hornsteinkalkbank, der Obere Zellenkalkstein oder ein Oolith (FREUDENBERGER 1996).

Der Mittlere Muschelkalk am Hochrhein wird nach WIDMER (1991) und HAUBER (1993) in die Untere Sulfatzone, das Salzlager mit Unteren Salzschichten, Unteren Brekzien, Unteren Anhydritschichten, Obere Salzschichten, Oberen Brekzien, die Obere Sulfatzone mit Oberen Anhydritschichten, Übergangsschichten, Dolomit-dominierte Schichten und die Dolomitzone unterteilt.

Auf Beschluss der Subkommission Perm - Trias der Stratigraphischen Kommission der DUGW (Protokoll der Sitzung, 19. Juli 1997 in Gotha) wird die Schichtenfolge der *orbicularis*-Schichten und des Unteren Dolomits als **Karlstadt-Formation** zusammengefasst, das Muschelkalk-Salinär wird als **Heilbronn-Formation** und die Oberen Dolomite als **Diemel-Formation** bezeichnet.

4.3 Grenzbereich Mittlerer/Oberer Muschelkalk

Ein sehr charakteristischer Abschnitt des Mittleren Muschelkalks sind die Oberen Dolomite sensu SEIDEL (1965). Dieser in den verschiedenen Gebieten unterschiedlich bezeichnete Horizont ist im Bereich des Mitteleuropäischen Beckens recht einheitlich ausgebildet. Nach KOZUR (1974) ist er durch eine reiche Ostracodenfauna eindeutig charakterisiert und wird der Assemblage-Zone *Speluncella pettersbergensis* zugerechnet. Der Stylolithenkalkstein Unterfrankens dürfte den basalen Oberen Dolomiten Württembergs entsprechen (HAGDORN et al. 1987). Überregionalen Leitwert besitzt eine oolithische, bioklastische Dolomit-/Kalksteinbank, die durch ein mehr oder weniger häufiges Auftreten von Hornsteinen gekennzeichnet ist und ca. 3 - 5 m unterhalb der Grenze zum Oberen Muschelkalk auftritt. Dieser Bereich lässt sich vom Tafeljura bis in das nördliche Harzvorland verfolgen.

Über die Grenze Mittlerer/Oberer Muschelkalk werden unterschiedliche Ansichten vertreten. Zwischen den reinen Dolomiten des Mittleren Muschelkalks und den ersten teilweise trochitenreichen, massigen Kalksteinbänken des Trochitenkalks liegt ein Profilabschnitt, der im Norddeutschen Becken seit HAACK (1926) als Gelbe Basisschichten bezeichnet und von KLEINSORGE (1935) als Übergangsfazies dem Oberen Muschelkalk zugerechnet wird. Lithologisch lassen sich die Gelben Basisschichten als eine Wechselfolge von Mergeln, dolomitischen Mergeln, Dolomiten und Kalksteinbänkchen mit wechselndem Schillanteil charakterisieren. Gegenüber dem Trochitenkalk sind die Echinodermenreste relativ gering. Maßgebendes Kriterium für die Untergrenze der Gelben Basisschichten und damit der Grenze Mittlerer/Oberer Muschelkalk (GROETZNER 1962, BUSSE & HORN 1982) ist der Umschlag von dolomitischer zu kalkiger Sedimentation. Diese Gliederung wurde im Allgemeinen bei der Bearbeitung des Profilabschnitts Mittlerer/Oberer Muschelkalk angewandt (SCHWAHN & GAHRMANN

Stufe	Unter-stufe	Deutschland		Norddeutschland		NW-Deutschland		Ost-Westfalen	Scholle v. Calvörde	NE-Deutschland	Thüringen		Subherzyn	Querfurter Mulde	Südniedersachsen		Hessen	Rhön		N-Bayern		Baden-Württemberg		Hochrhein
		Gliederung Subkommission Perm-Trias	BRÜCKNER-RÖHLING (1998)	WOLBURG (1969)	GAERTNER & ROEHLING (1993)	FARRENSCHON (1986, 1990)	SCHULZE (1964)	ALTHEN, RUSBÜLT, SEEGER (1980)	SEIDEL (1965)	MERZ (1987)	SCHWAHN & GAHRMANN (1976)	RADZINSKI (1971)	DÜNKEL & VATH (1991)	DÜNKEL (1992)	BUSSE & HORN (1991)	BACKHAUS (1969)	FREUDENBERGER (1996)		SIMON (1988)	FRIEDEL (1988)	WIDMER (1991), HAUBER (1993)			
		Subgruppe	Formation	Formation	Zyklus												Salinar-Fazies		geringer salinare Fazies					
Anis	Illyr	Oberer Muschelkalk	Trochitenkalk-Formation	Trochitenkalk-Formation	Trochitenkalk	Oberer Muschelkalk		Trochitenkalk	Unterer Hauptmuschelkalk	Trochitenkalk	mo	„Tonplatten-fazies“	Trochitenkalk	Haupttrochitenkalk (mo1)	Encriinus-Schichten	Unterer Trochitenkalk	Trochitenkalk (mo1)	Wulstkalkstein	mo1	Wulstkalkstein	Oberer Muschelkalk	Oberer Muschelkalk	Oberer Muschelkalk	
		Diemel-Formation	Diemel-Formation	9	Dolomit-Mergel-Serie (mm2)	Obere Dolomit-mergel	Gelbe Basisschichten	Dolomit VI	D 6	Oberer Dolomit	mm5	Gelbe Basisschichten	Oberes	Gelbe Basisschichten (mo1)	Obere Basis-schichten	Obere Dolomit	mm3	Oberer Zellenkalk/Oolith Hornstein-kalkbank Styrolithenkalk	Obere Dolomit-region	Oberer Dolomit (mm7)	Oberer Dolomit-zone			
							Obere Mergel-Folge	Wechsel-lagerung	mm4	Obere Wechsel-lagerung	mm4	Obere Rückstands-bildungen	Rückstands-bildungen	Obere Residual-bildung	Oberes Sulfat	mm2	Residual-tone und mergel	Anhydrit-region	Oberes Sulfat (mm6)	Obere Sulfat-zone				
								Gips V	A 5															
								Dolomit V	D 5															
								Gips IV	A 4															
								Dolomit IV	D 4															
								Gips III	A 3															
								Dolomit III	D 3															
								Gips II	A 2															
		Mittlerer Muschelkalk	Formation	Heilbronn-Formation	Heilbronn-Formation	mm-Salinar (mm1)	Muschelkalk	Dolomit II	D 2	Mittlerer Dolomit	mm3	Mittleres Karbonat	Mittleres Karbonat (mmD2)	Mittlerer Dolomit	Mittlerer Dolomit (mm5)	Mergel-Folge	Dolomit-Folge	mm3	Residual-tone und mergel	Anhydrit-region	Mittlerer Dolomit (mm5)	Salzlagern		
								Gips lb	A 1b	Mittlere Wechsel-lagerung		Untere	Untere	Unteres Sulfat (mm4)	Untere Residual-bildung									
								D N																
								Oberes Sulfat		Steinsalz		Steinsalz		Steinsalz (mm3)	Unteres Steinsalz-lager									
								Untere Mergel-zwischenmittel	A 1a	Unteres Sulfat		Untere Wechsel-lagerung		Basisulfat (mm2)	Untere Zellen-kalke									
								Dolomit I	D1	Unterer Dolomit	mm1	Unteres Karbonat	Karbonat	Dolomit 1 (mmD1)	Unterer Dolomit (mm1)	Untere Mergel-Dolomit-Folge	Untere Mergel-Dolomit-Folge	mm1	Unteres Sulfat und mergel	Unterer Residualton (mm3)	Grund-anhydrit (mm2)	Untere Sulfatzone		
								Orbicularis-schichten						Orbicularis-schichten (muOR)	Orbicularis-schichten (muOR)									
								Untere Muschelkalk	Jena-Formation	Jena-Formation				Bereich der Schaumkalk-bänke										
								Unterer Muschelkalk	Jena-Formation	Jena-Formation				Schaumkalk-bänke	Schaumkalk-bänke 1-3	Schaumkalk-zone	Schaumkalk-zone	mu3	Schaumkalk-bänke 1-3	Untere Dolomite Basisschichten (mm1)	Unterer Dolomit (mm1)	Orbicularis-schichten		

Tab. 4: Gliederung des Mittleren Muschelkalks in Norddeutschland

1976, DUCHROW & GROETZNER 1984, FARRENSCHON 1986, 1990, HAGDORN et al. 1987, RÖHL 1988, DÜNKEL & VATH 1990, DÜNKEL 1992).

In Thüringen wird die Grenze zum Oberen Muschelkalk seit SEIDEL (1965) an die Basis des Trochitenkalks gelegt. Diese Grenze wird von KOZUR (1974) bestätigt, der sie an der Basis fossilreicher Knauerkalke zieht. Sie ist mikropaläontologisch scharf ausgeprägt und wird durch das erste Einsetzen der Ostracode *Speluncella (Pulviella) teres* charakterisiert.

Auf Beschluss der Subkommission Perm - Trias der Stratigraphischen Kommission der DUGW (Protokoll der Sitzung, 19. Juli 1997 in Gotha) wird die Grenze Mittlerer/Oberer Muschelkalk an die Basis des Trochitenkalks gelegt.

4.4 Oberer Muschelkalk

Der Obere Muschelkalk wird allgemein in Trochitenkalk und Ceratitenschichten gegliedert. In Süddeutschland konnte aufgrund hervorragender Aufschlussverhältnisse eine detaillierte Bankstratigraphie erarbeitet werden (u. a. WAGNER 1913, GEISLER 1939, WIRTH 1957, HOFFMANN 1967a, b, SKUPIN 1970, GWINNER 1970). Als besonders wichtige Leitbänke werden z. B. die *Tetractinella*-Bank, die *Spiriferina*-Bank, die *cycloides*-Bank und die Hauptterebratelbank unterschieden. Diese lassen sich in Norddeutschland aufgrund eines höheren Anteils an Mergel- und Tonsteinen teilweise nur schwer identifizieren. Hier hat sich die Gliederung nach Ceratiten bewährt (RIEDEL 1918, WENGER 1957), die im gesamten Mitteleuropäischen Becken angewendet werden kann (u. a. BUSSE 1970, SPARFELD 1980, URLICH & MUNDLOS 1980, 1990, URLICH & VATH 1990, URLICH 1993) und somit Parallelisierungen zwischen Nord- und Süddeutschland ermöglicht. Eine durch charakteristische Fossilführung gekennzeichnete Leitbank ist auch die Hauptcrinitenbank Unterfrankens, die von Mittelwürttemberg bis Niedersachsen beschrieben ist. Auch für die süddeutsche und thüringische *cycloides*-Bank dürfte eine überregionale Verbreitung angenommen werden (HAGDORN et al. 1987).

Auf Beschluss der Subkommission Perm - Trias der Stratigraphischen Kommission der DUGW (Protokoll der Sitzung, 19. Juli 1997 in Gotha) wird für den Trochitenkalk der Begriff Trochitenkalk-Formation eingeführt. Die Ceratitenschichten werden in Meißner-Formation und abhängig von regional-fazieller Ausbildung in Warburg-Formation (Nord- und Mitteldeutschland), Rottweil-Formation (Süddeutschland) und Irrel-Formation (Eifel) umbenannt. In der Oberpfalz wird der Obere Muschelkalk als Grafenwöhr-Formation ausgehalten.

4.5 Logstratigraphie

Für Bereiche, in denen die zu untersuchenden Schichtenfolgen nicht obertägig anstehen, sind die geophysikalischen Bohrlochmessungen zu einem unerlässlichen Hilfsmittel zur Klärung der Stratigraphie der durchbohrten Schichtenfolgen geworden.

Erste Arbeiten zur Gliederung der triassischen Schichtenfolge mit Hilfe von Bohrlochmessungen gehen auf BOIGK (1961a, 1961b), SCHULZE (1964), TRUSHEIM (1961, 1963) und WOLBURG (1956, 1969) zurück. SCHULZE (1964) war dabei der erste, der den Muschelkalk im Bereich der Scholle von Calvörde lithostratigraphisch mit Hilfe von Bohrlochmessungen gliederte. WOLBURG (1969) erarbeitete die erste logstratigraphische Gliederung des Muschelkalks für Nordwestdeutschland und konnte die Zyklizität innerhalb der Karbonat-Tonmergel-Abfolge, die bereits FIEGE (1938) im Aufschluss erkannt hatte, mit Hilfe der geophysikalischen Bohrlogs aufzeigen.

SCHULZE (1964) gelang es anhand lithologischer und paläontologischer Kriterien sowie mit Hilfe geophysikalischer Bohrlochmessungen (Gamma-Ray-Log und Widerstandsmessung), den Mittleren Muschelkalk in NE-Deutschland zu untergliedern. Für die Scholle von Calvörde wurden sechs dolomitische (Dolomit VI - I) und fünf sulfatische (Gips V - I) Schichtpakete ausgehalten. Die Grenze Unterer Muschelkalk/Mittlerer Muschelkalk wird von SCHULZE ca. 3 m oberhalb des Bereichs der Schaumkalkbänke gelegt, oberhalb einer plattig-flaserig-knauerigen Schicht, die den *orbicularis*-Schichten entspricht. Die Grenze Mittlerer/Oberer Muschelkalk ist durch das erstmalige Auftreten von flaserigen und plattigen Kalksteinen gekennzeichnet.

Wie bereits erwähnt, wurde der Muschelkalk Nordwestdeutschlands erstmals von WOLBURG (1969) mit Hilfe geophysikalischer Bohrlochmessungen genauer gegliedert. Dabei wurden zur Bearbeitung das Gamma-Ray-Log und das Sonic-Log genutzt. WOLBURG unterteilte den Mittleren Muschelkalk in das Salinar (mm1) und die Dolomit-Mergelserie (mm2), wobei er den mm2 in die Gruppen a bis d untergliedert. Die Schichtenfolge oberhalb des Bereichs der Schaumkalkbänke bis zum Liegenden der Salinarabfolge wird von WOLBURG als Gruppe i dem Unteren Muschelkalk zugerechnet.

Auf der Grundlage einer einheitlichen Bearbeitung von Bohrlochmessungen (Gamma-Ray und Widerstandsmessungen) für das Gebiet der ehemaligen DDR gelang es ALTHEN et al. (1980) eine durchgehende Korrelation des Muschelkalks vorzunehmen. Es wurden in Anlehnung an die Scholle von Calvörde (SCHULZE 1964) und an Thüringen (SEIDEL 1965) sechs Dolomite und fünf Anhydrite unterschieden. Die Grenze Unterer/Mittlerer Muschelkalk wird von ALTHEN et al. an die Basis der *orbicularis*-Schichten gelegt – im Gamma-Ray-Log durch ein markantes Minimum gekennzeichnet. In den Widerstandsmessungen ist diese Grenze aufgrund der unterschiedlich einsetzenden Dolomitierung nicht immer eindeutig zu fassen. Die Grenze Mittlerer/Oberer Muschelkalk ist an der Basis des Trochitenkalks, eines bankigen Kalksteins, zu finden. Sie ist vor allem in den beckentieferen Teilen nicht immer eindeutig, da in diesen Bereichen die den Beginn des Trochitenkalks (bzw. äquivalente Bildungen) anzeigen starken Ausschläge in den Widerstandskurven fehlen. Aufbauend auf den logstratigraphischen Gliederungen von SCHULZE (1964) und ALTHEN et al. (1980) wurden in der Arbeit von BEUTLER (1993) weitere logstratigraphische Interpretationen von Tiefbohrungen im Bereich Nordostdeutschlands vorgenommen. BRÜCKNER-RÖHLING & LANGBEIN (1993) konnten an einer Bohrung aus dem Subherzyn zeigen, dass sich die in den Bohrkernen erkannten lithostratigraphischen Einheiten des Mittleren Muschelkalks zwanglos mit der logstratigraphischen Gliederung nach SCHULZE (1964) parallelisieren lassen.

Während TRUSHEIM (1971) mit Hilfe von Bohrlochmessungen in Bohrungen Nordwestdeutschlands im Mittleren Muschelkalk bis zu vier Steinsalzhorizonte aushalten konnte, gelang es GAERTNER & RÖHLING (1993) bis zu sechs Steinsalzhorizonte zu identifizieren. GAERTNER (1993) und GAERTNER & RÖHLING (1993) gliederten den Mittleren Muschelkalk NW-Deutschlands in 13 Kleinzyklen, die sie zu drei lithologisch definierten Folgen zusammenfassten. Vom Liegenden zum Hangenden sind dies die Untere Dolomit-Wechselfolge (Kleinzyklus I bis IV), die Salinar-Folge (Kleinzyklus V bis X) und die Obere Dolomit-Wechselfolge (Kleinzyklus XI bis XII). Die Kleinzyklen wurden ausschließlich lithostratigraphisch mit Hilfe von Logs definiert, eine Korrelation mit Aufschluss- bzw. Kernbohrprofilen erfolgte nicht. Der Mittlere Muschelkalk NE-Deutschlands blieb bei den Untersuchungen von GAERTNER & RÖHLING (1993) jedoch unberücksichtigt.

5 DAS REFERENZPROFIL FÜR DEN MITTLEREN MUSCHELKALK IN NORDDEUTSCHLAND – DIE BOHRUNG REMLINGEN 7

5.1 Lage und strukturelle Position der Bohrung Remlingen 7

TK25: 3829, Blatt Wolfenbüttel

Koordinaten: R 44 08 461

H 57 77 920

Höhe ü. NN: 181,32 m

Die Bohrung Remlingen 7 wurde an der Südwestflanke der langgestreckten, in NW-SE-Richtung verlaufenden Struktur Asse abgeteuft. Die Asse befindet sich am Westrand des Subherzyn-Beckens zwischen der Aufwölbung des Elms im NE und des Großen Fallsteins im S und wird von der Schöppenstedter Kreidemulde im NE und der Remlinger Kreidemulde im SW begrenzt (Abb. 8). Im Oberflächenbild ist dieses Gebiet durch die „Breitsättel“ des Elms und des Fallsteins und den „Schmalsattel“ der Struktur Asse gekennzeichnet.

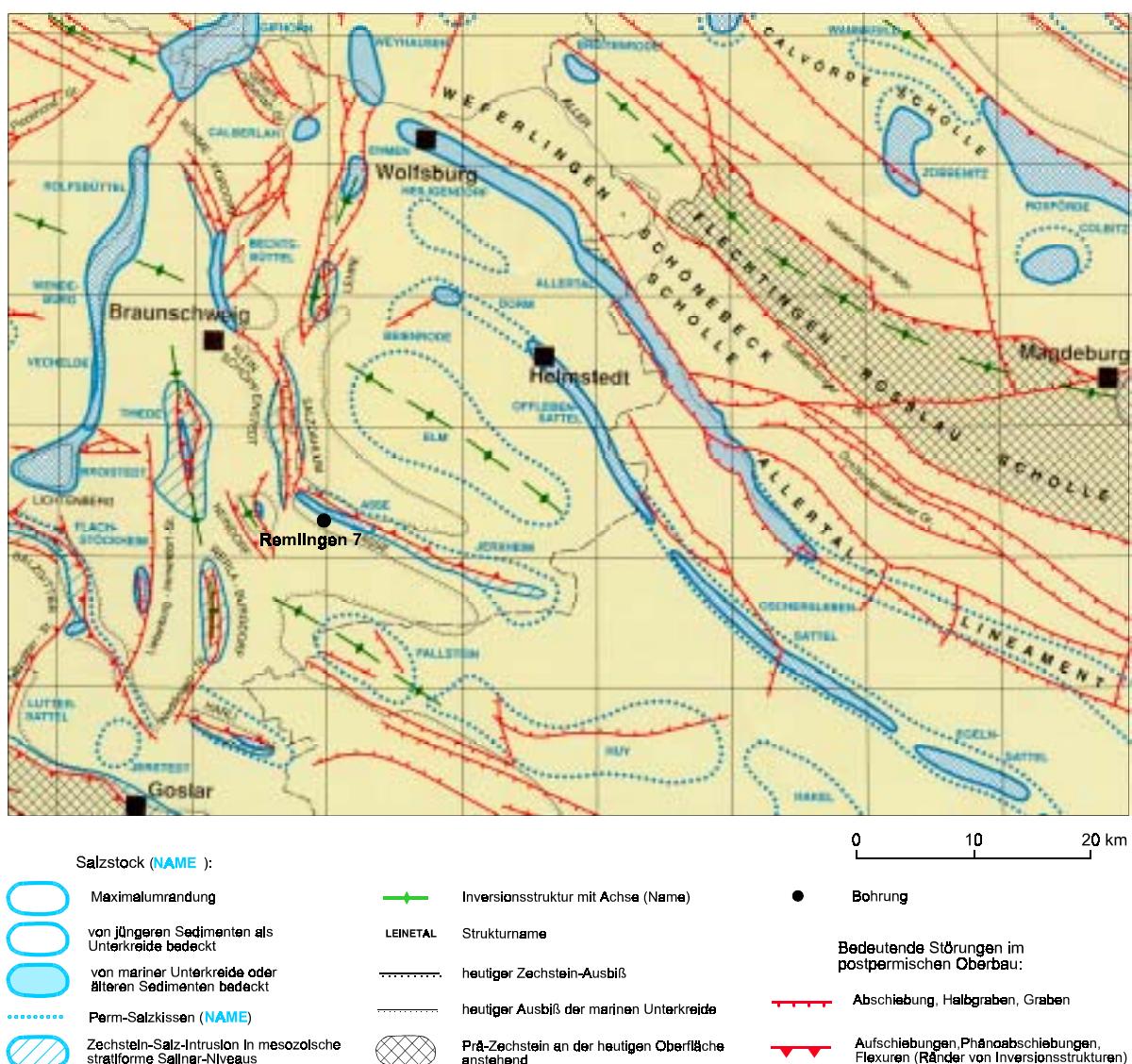


Abb. 8: Tektonische Strukturen im nördlichen Harzvorland (nach BALDSCHUHN et al. 1999)

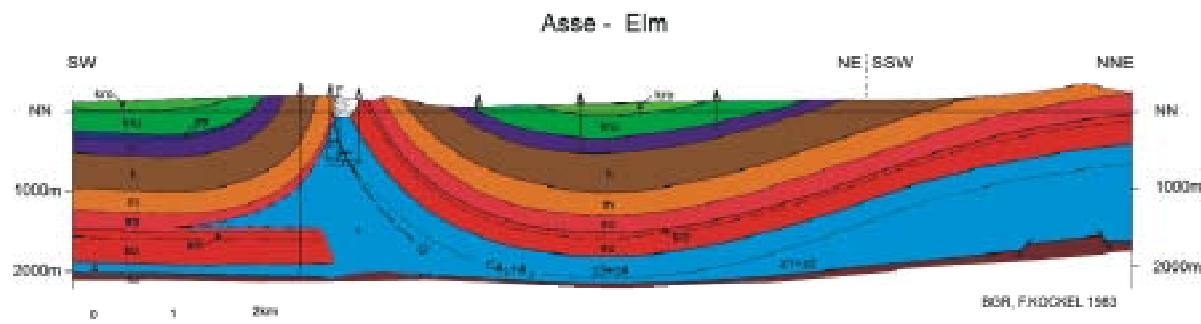


Abb. 9: Geologisches Profil der Struktur Asse (KOCKEL 1983)

Die Struktur Asse wird durch SE-vergente Kernüberschiebungen sowie im Röt-Niveau eingedrungene Salzkeile charakterisiert (KOCKEL 1991). Sie ist durch asymmetrisch steile Flanken gekennzeichnet, wobei die Südflanke steiler als die Nordflanke ist (Abb. 9). Die Bohrung Remlingen 7 durchhörte steil aufgerichteten Keuper und Muschelkalk und wurde im Röt eingestellt (Abb. 10). Paläogeographisch ist die Bohrung am Ostrand der Eichsfeld-Altmark-Schwelle gelegen, eines der bedeutendsten paläogeographischen Strukturelemente des Norddeutschen Beckens in der Trias, insbesondere des Buntsandsteins.

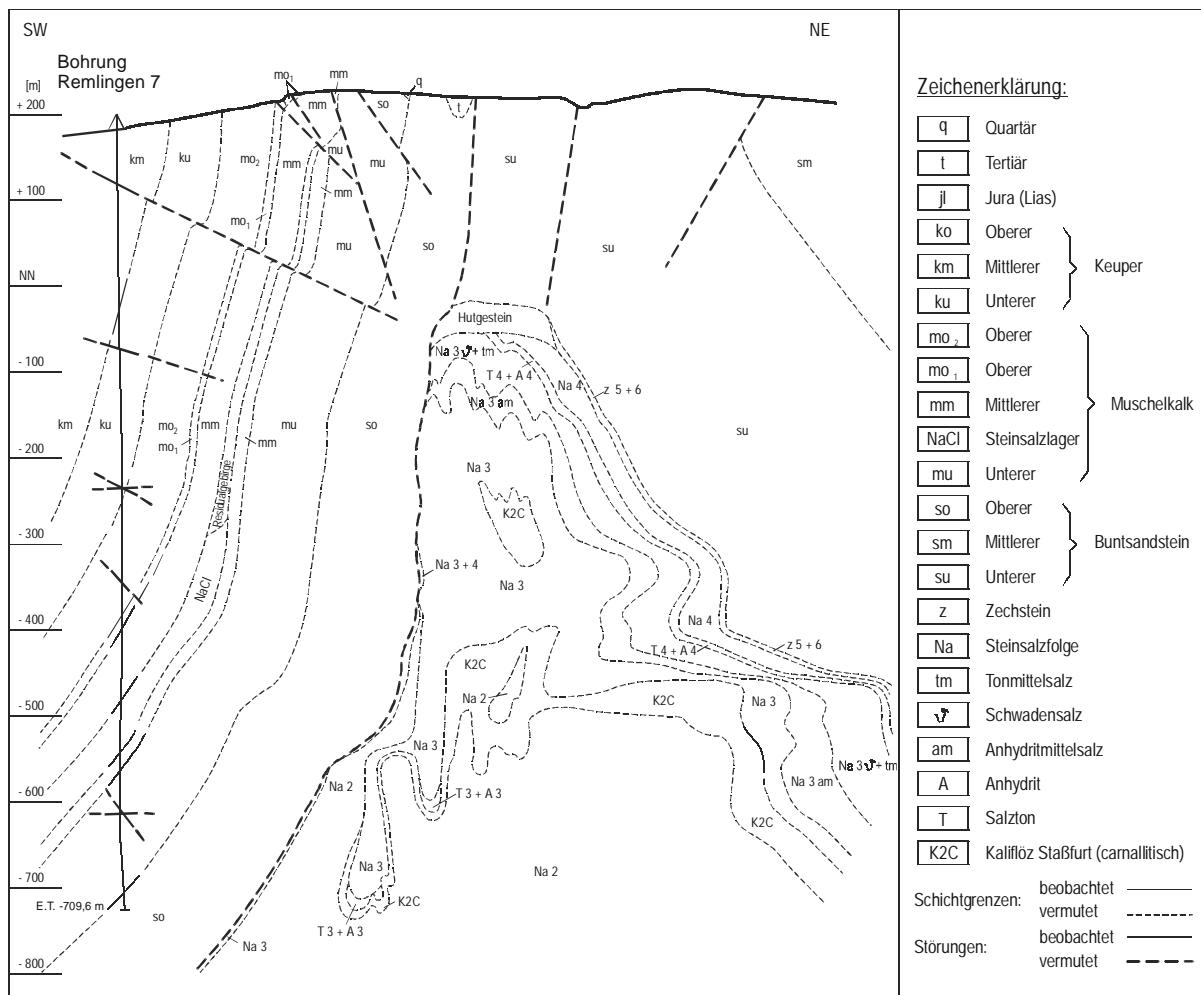


Abb. 10: Geologischer Querschnitt durch die Salzstruktur Asse mit der Bohrung Remlingen 7 (nach KLARR et al. 1990)

Die Struktur Asse wurde von BORNEMANN (1979) als einfache, halokinetische Salzaufwölbung, als Salzkissen, beschrieben, das möglicherweise gerade vor dem Durchbruch steht. Neuere, auf reflektionsseismischen Messungen beruhende Untersuchungen (KOCKEL 1983), die ihre Bestätigung in der Bohrung Remlingen 5 fanden, haben gezeigt, dass es sich bei der Struktur Asse um eine Abgleitstruktur handelt; ausgeprägte sekundäre Randsenken sowie eine deutliche präkretazische Vorprägung fehlen. Abgleitstrukturen bilden sich im Oberbau an den Rändern von Sockelaufwölbungen. Typisch ist das Einwandern von Zechsteinsalz in die Salinarhorizonte des Röts und Muschelkalks. Für die Struktur Asse werden nach KOCKEL (1983, 1991) Rutschbewegungen im postsalinaren Oberbau am Südhang der Elm-Sockelaufwölbung angenommen. Ein santones Bildungsalter wird postuliert.

5.2 Kernmaterial der Bohrung Remlingen 7

Der Kern der Bohrung Remlingen 7 wurde im Teufenbereich von 578,85 - 754,16 m bearbeitet. Neben einer lithologischen Aufnahme und der Messung der natürlichen Radioaktivität an den Bohrkernen erfolgten mikrofazielle, geochemische und palynologische Untersuchungen.

Die Schichten zeigen ein Einfallen von 45° - 65° SW. Die Grenze Unterer/Mittlerer Muschelkalk wurde bei 738,77 m, die Grenze zum Oberen Muschelkalk bei 581,06 m erbohrt. Während die Scheinmächtigkeit des Mittleren Muschelkalks bei 157,71 m liegt, beträgt die wahre Mächtigkeit unter Berücksichtigung des durchschnittlichen Schichteinfallens von 56° ca. 86 m.

Aufgrund der lithologischen Ausbildung des Mittleren Muschelkalks in der Bohrung Remlingen 7 wird dieser in der vorliegenden Arbeit in neun Einheiten (Zyklen, Tab. 5) gegliedert, die wiederum z. T. in Untereinheiten unterteilbar sind (Abb. 13). Diese Zyklen zeigen bei idealer Ausbildung folgenden Aufbau: über einem dolomitisch geprägtem basalen Abschnitt folgen mehr oder weniger karbonatisch-mergelig laminierte Sulfate, die nach oben in reinere, massive, laminierte Sulfate übergehen. Den Abschluss bildet ein unterschiedlich mächtiger Halithorizont, der im unteren Abschnitt überwiegend anhydritisch und im oberen Abschnitt dolomitisch-mergelig verunreinigt ist. Ein solcher Zyklus ist in Abbildung 11 dargestellt. Wie im Logbild erkennbar, spiegelt sich der zyklische Aufbau nicht nur in der Lithologie sondern auch in den geophysikalischen Bohrlochmessungen in charakteristischer Weise wider. Die Basis des dargestellten Zyklus ist durch einen markanten Anstieg der Gamma-Strahlung mit einer charakteristischen Strahlungsspitze nach rechts in Richtung höherer Gammastrahlung sowie durch höhere Schall-Laufzeiten im Sonic-Log gekennzeichnet. Das darüber folgende Anhydritpaket zeigt im Gamma-Ray-Log einen deutlichen Rückgang der natürlichen Gammastrahlung. Der im Log erkennbare Wechsel von Abschnitten geringerer Gammastrahlung (Logspitze nach links) und Abschnitten höherer Gammastrahlung (Logspitze nach rechts) ist durch wechselnde Merganteile im Anhydrit bedingt. Im Sonic-Log weist dieser Bereich die für Anhydrit typischen niedrigen Schall-Laufzeiten auf. Reine Halite besitzen im Allgemeinen die geringste Gammastrahlung. Das den Zyklus abschließende Steinsalzpaket ist deutlich zweigeteilt. Gegenüber dem tieferen, anhydritisch verunreinigten und insgesamt geringstrahlenden Abschnitt weist der obere Abschnitt bedingt durch dolomitisch-mergelige Verunreinigungen höhere Strahlungswerte auf. Der unruhige Logverlauf wird durch Wechsellagerungen von relativ reinen Haliten mit stärker verunreinigten Partien verursacht. Im Sonic-Log hebt sich der Halit gegenüber dem unterlagernden Anhydrit durch höhere, gleichbleibende Schall-Laufzeiten ab. Eine im unteren Teil des Halithorizontes erkennbare Spitze im Sonic-Log (nach rechts zu geringeren Schall-Laufzeiten) ist auf eine anhydritische Zwischenlage zurückzuführen.

Die erkannten Sedimentationszyklen lassen sich eindeutig an bereits bestehende, ältere Gliederungen (SCHULZE 1964, TRUSHEIM 1971, GAERTNER & RÖHLING 1993) sowie an die durch die Subkommission Perm-Trias definierte Lithostratigraphie des Muschelkalks anbinden. Von den 9 Zyklen entsprechen der Zyklus 1 der Karlstadt-Formation, die Zyklen 2 - 8 der Heilbronn-Formation und der Zyklus 9 der Diemel-Formation.

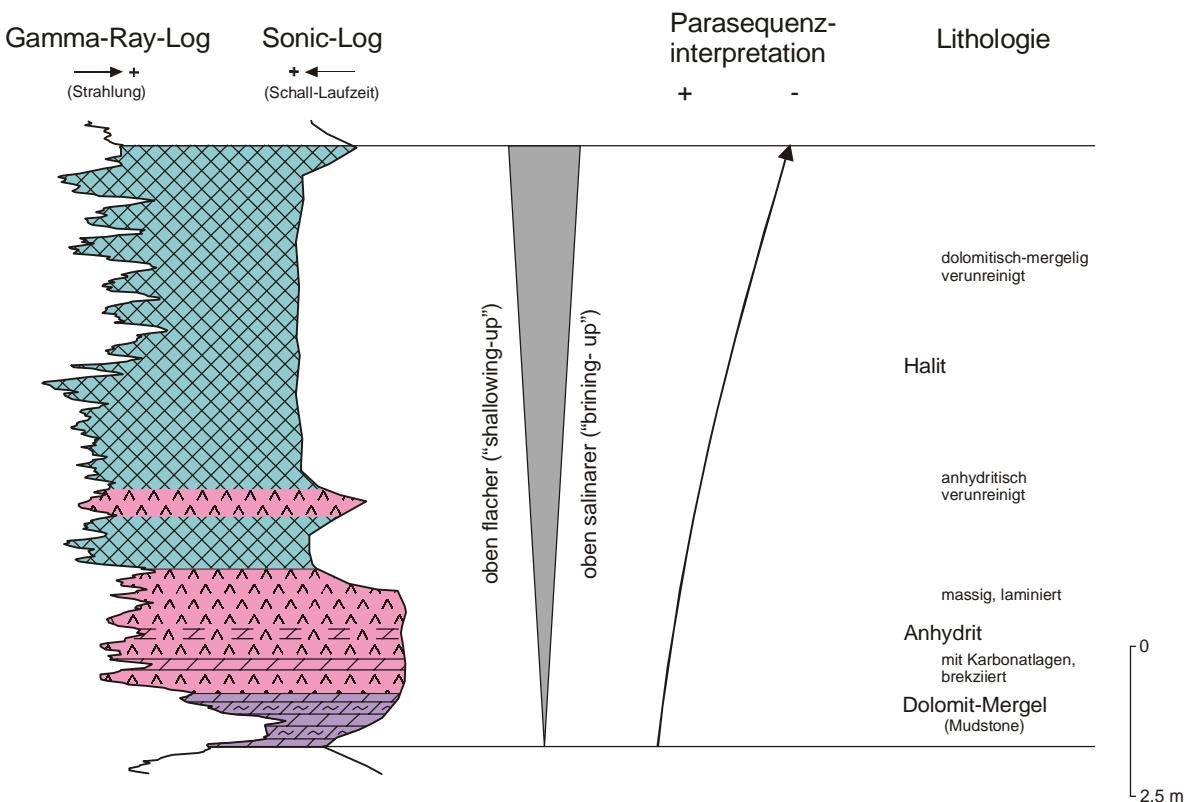


Abb. 11: Typischer Zyklus des Mittleren Muschelkalks am Beispiel des Zyklus 3 der Bohrung Remlingen 7

Lithostratigraphie	Zyklus	Bohr-Teufe	wahre Mächtigkeit*
Diemel-Formation	Zyklus 9	581,06 m - 596,15 m	8,5 m
Heilbronn-Formation	Zyklus 8	596,15 m - 612,86 m	9,0 m
	Zyklus 7	612,86 m - 630,21 m	10,0 m
	Zyklus 6	630,21 m - 641,16 m	6,0 m
	Zyklus 5	641,16 m - 669,46 m	16,0 m
	Zyklus 4	669,46 m - 670,73 m	20,5 m
	Zyklus 3	705,75 m - 723,64 m	10,0 m
	Zyklus 2	723,64 m - 727,60 m	2,5 m
Karlstadt-Formation	Zyklus 1	727,60 m - 738,77 m	6,0 m

*wahre Mächtigkeit bei einem durchschnittlichen Schichteinfallen im Kern von 56° (45° - 65°)

Tab. 4: Lithologische Gliederung des Mittleren Muschelkalks in der Bohrung Remlingen 7

5.3 Gammastrahlungsmessungen an den Bohrkernen der Bohrung Remlingen 7

Zusätzlich zu den für die Bohrung Remlingen 7 vorliegenden industriellen geophysikalischen Bohrlochmessungen (Schlumberger) wurden an den Bohrkernen Szintillometermessungen mit der tragbaren „Heger-Sonde“ (Kap. 3.2.2) durchgeführt. Diese Untersuchungen erschienen aus mehreren Gründen sinnvoll. Zum einen war es bei der Gamma-Ray-Vermessung des Bohrlochs zu Messlücken gekommen, d.h. die während der verschiedenen Messestufen gefahrenen Gamma-Ray-Logs überschnitten sich nicht, so dass keine exakte Konnektierung der in den verschiedenen Teufen gewonnenen Logs möglich war. Zum anderen erlaubt eine nachträgliche Vermessung der Bohrkerne eine direkte Zuordnung der ermittelten Gammastrahlungswerte zur lithologischen Ausbildung des untersuchten Kernbohrprofils.

Die Gliederung des Mittleren Muschelkalks in den Bohrlochmesskurven ist im wesentlichen lithologisch-petrographisch begründet und beruht auf dem zyklischen Wechsel von Dolomiten, mergeligen Dolomiten, Anhydriten und Steinsalzen. Diese Gesteine lassen sich auch im Gamma-Ray-Log durch ihre unterschiedlichen Strahlungsintensitäten sehr gut identifizieren, so dass bereits über die Gamma-Ray-Messkurve eine differenzierte Untergliederung der Schichtenfolge vorgenommen werden kann.

Die natürliche Gammastrahlung der verschiedenen Gesteine des Mittleren Muschelkalks der Bohrung Remlingen 7 liegt im Durchschnitt zwischen weniger als 10 und etwa 70 API, wobei diese Werte bei der Gamma-Ray-Bohrlochmessung ermittelt worden sind. Die während der Bohrkernvermessung ermittelten Gammastrahlungswerte mit dem Gamma-Szintillometer („Heger-Sonde“) liegen zwischen etwa 50 und 65 cps. Die unterschiedlichen Messwerte der Bohrkern- und der Bohrlochvermessung sind u. a. vom Gerätetyp abhängig (SCHLUMBERGER 1982). Dabei spielen vor allem die Kristallkonfiguration, die Bandbreite der Empfangsenergie oder auch das Gehäusematerial eine bedeutende Rolle. Auch erfolgte vom Hersteller des zur Verfügung stehenden Messgerätes keine Eichung an die API-Norm, einer Standardnorm bei Gamma-Ray-Messungen in Bohrungen vor allem der auf Erdöl- und Erdgas explorierenden Firmen. Auf den ersten Blick weist die Gamma-Ray-Kurve der Bohrkernvermessung eine geringere Schwankungsbreite der Messwerte auf. Bei einer nachträglichen Spreizung der x-Achse wird aber deutlich, dass beide Gamma-Ray-Messkurven einen annähernd identischen Kurvenverlauf aufweisen (Abb. 12). Dies ist nicht verwunderlich, registrieren doch beide Kurven die gleiche Schichtenfolge sowie den gleichen physikalischen Effekt. Dennoch sind einige markante Unterschiede erkennbar. So zeigt die Gamma-Ray-Kurve der Bohrkernvermessung ein wesentlich unruhigeres Logmuster als die Kurve der Bohrlochvermessung. Ursache ist vor allem die statische Vermessung des Bohrkerns, d.h. die Gammastrahlungsmessungen mit der „Heger-Sonde“ erfolgen Punkt für Punkt im Abstand von 5 cm. Durch diese hohe Messpunktdichte kommt es zu einer wesentlich höheren Auflösung als bei der dynamischen industriellen Vermessung des Bohrlochs. Bei der ersten Methode lassen sich z. B. auch noch solche Schichtseinheiten messtechnisch erfassen und zuordnen, die nur wenige cm mächtig sind und die bei der Bohrlochvermessung aufgrund des dynamischen Messprinzips und des geringeren Auflösungsvermögens der Messsonden nicht mehr erfasst werden können.

Markante Strahlungsspitzen lassen sich sowohl in der „Schlumberger“-Kurve als auch in der „Heger“-Kurve eindeutig wiederfinden. In einer Teufe oberhalb 600 m ist jedoch ein Versatz der korrelierenden Strahlungsspitzen zu beobachten. Bei einem Vergleich der Gamma-Kurven mit der Sonic-Kurve zeigt sich, dass das Gamma-Ray-Log der Bohrlochvermessung ca. 1,5 m nach oben versetzt ist. Dieser Versatz wird auf das Ende sowie den Beginn einer Messroutine zurückgeführt. Oberhalb der Teufe von 600 m weicht die Logteufe ca. 1,5 m von der Bohrteufe ab.

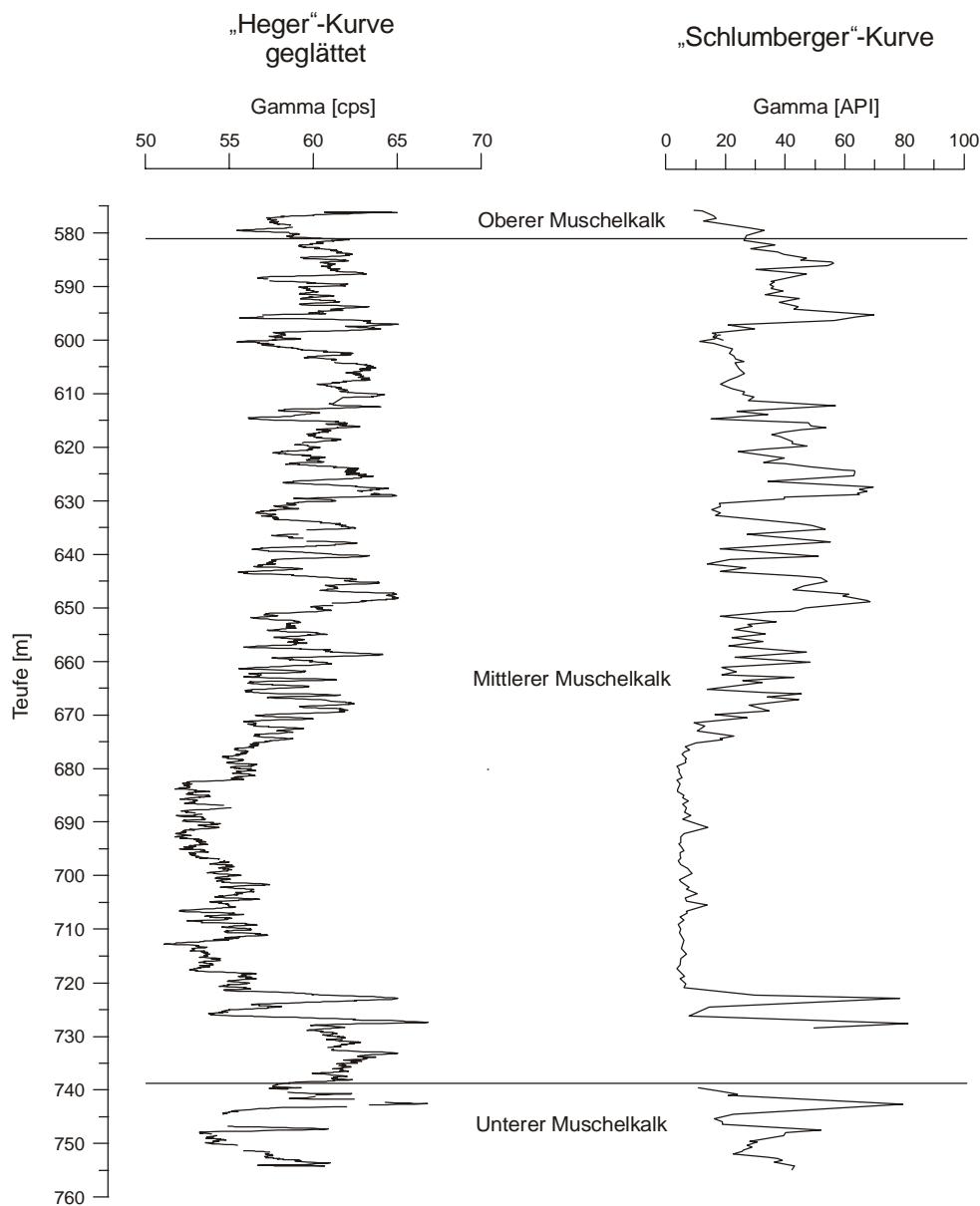


Abb. 12: Gegenüberstellung der Gamma-Ray-Logs der Bohrkernvermessung („Heger“-Kurve, Gleitfaktor 10) und der geophysikalischen Bohrlochvermessung („Schlumberger“-Kurve) der Bohrung Remlingen 7

Um ein etwas ruhigeres Logbild der Bohrkernvermessung zu erhalten, wurde die Kurve einer Glättung unterzogen. Dabei wird für jeden einzelnen Messwert durch Vergleich mit einer vorher definierten Anzahl von benachbarten Messwerten (Glättungsfaktor) ein neuer Wert ermittelt. In Abb. 13 sind Kurven mit unterschiedlichen Glättungsfaktoren gegenübergestellt. Aufgrund des durch dieses Glättungsverfahren erzielten „ruhigeren“ Logbildes sind die Kurven der Bohrkern- und der -Bohrlochvermessung in dem hier verwendeten Maßstab sehr gut vergleichbar. Für kleinmaßstäbliche Darstellungen sowie vor allem auch für eine Anbindung an die entsprechenden lithologischen Aufnahmen empfiehlt sich eine Glättung der Kurven nicht, da markante Logspitzen durch die Angleichung an die benachbarten deutlich geringeren Messwerte im cm-Bereich an Intensität deutlich verlieren oder auch vollständig unterdrückt sowie auch verschoben werden können. Daher wurde z. B. für die Darstellungen im Maßstab 1:50 auf eine Glättung der Messkurven der Bohrkernvermessung verzichtet. Dies er-

möglich – wie bereits erwähnt – eine exakte, teufengerechte Einhängung von Bohrkernen in vorhandene Bohrlochmessungen sowie die Zuordnung von Lithologien zu bestimmten Logspitzen.

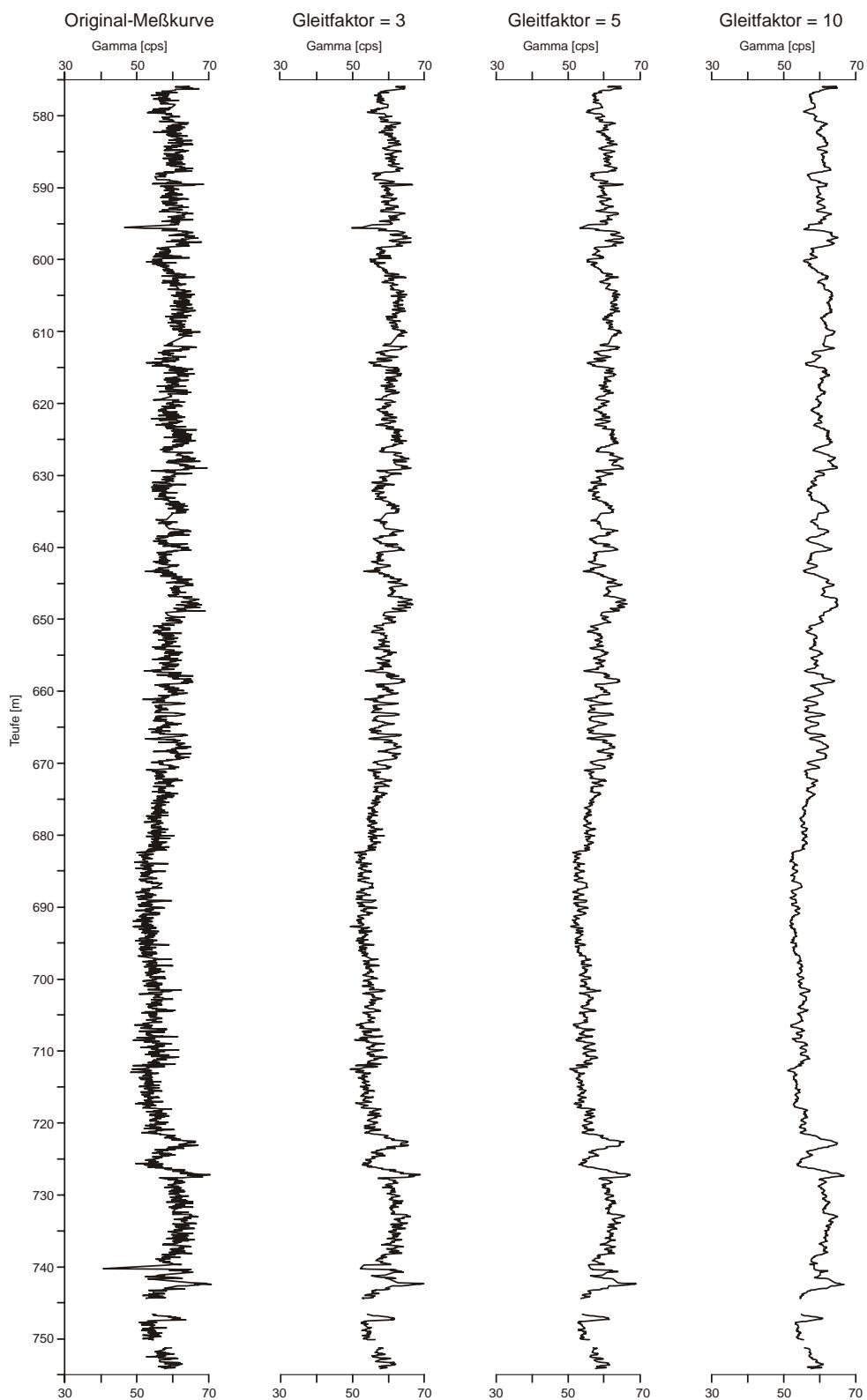


Abb. 13: Gegenüberstellung von mit unterschiedlichen Faktoren geglätteten Gamma-Ray-Logs der Kernvermessung der Bohrung Remlingen 7

5.4 Lithologie und Logbild des Mittleren Muschelkalks in der Bohrung Remlingen 7

5.4.1 Das Liegende des Mittleren Muschelkalks (Abb. 14, Anl. 4, Taf. 31 - 34)

Der Bereich der Schaumkalkbänke des Unteren Muschelkalks (Jena-Formation) wird von grauen ebenflächigen, plattigen Mergelkalken aufgebaut, denen hellbraune, schwach poröse, z. T. peloidführende, mikritische Dolomite zwischengeschaltet sind. Feinverteilt sind Anhydritdrusen enthalten, die z. T. Größen bis in den cm-Bereich haben können. Die grauen Mergelkalke sind z. T. hellbraun gefleckt, was z. T. auf einen erhöhten Anteil an organischer Substanz, z. T. auf partielle Dolomitisierung zurückzuführen ist. Die schwach porösen Dolomite werden als Äquivalente der Unteren und Mittleren Schaumkalkbank gedeutet. Lithologisch konnten diese beiden Schaumkalkbänke nicht eindeutig abgegrenzt werden, da diese Bereiche aufgrund früherer Beprobungen nicht mehr als Bohrkern für die lithologischen Bearbeitung zur Verfügung standen. Die Abgrenzung erfolgte daher logstratigraphisch. Die Obere Schaumkalkbank ist als Peloid-Dolomit ausgebildet. Die Peloide sind in der Schichtung eingeregelt, Schrägschichtung konnte beobachtet werden. Innerhalb der Oberen Schaumkalkbank nimmt der Peloidanteil bis auf ca. 70 % zu. Ein abrupter Wechsel von der Calcitfazies des Unteren Muschelkalks zur Dolomitfazies wurde nicht beobachtet. Die obere Schaumkalkbank ist bereits vollständig sekundär dolomitisiert.

Im Logbild lässt sich der **Bereich der Schaumkalkbänke** aufgrund seiner lithologischen Differenzierung gut identifizieren. Typisch sind relativ scharfe, abrupte Wechsel der Strahlungsintensitäten im Gamma-Ray und der Schall-Laufzeiten im Sonic-Log. Charakteristisch für die einzelnen Schaumkalkbänke (muS1, muS2, muS3) ist eine geringe natürliche Radioaktivität. Dies bedeutet, dass in der Messkurve diese Karbonatbank-Bereiche Gamma-Ray-Ausschläge nach links zu geringeren Strahlungswerten hin aufweisen, während sie im Sonic-Log durch eine höhere Schallhärte, d.h. geringere Laufzeiten (Ausschläge nach rechts) charakterisiert sind. Die im Bereich der Schaumkalkbänke eingeschalteten mergeligen Zwischenmittel sind, bedingt durch ihren höheren Tonanteil, durch Gammastrahlungsspitzen (Peaks nach rechts, G1 (M), G2 (M)) sowie geringere Ausschläge in der Sonic-Kurve nach links zu höheren Laufzeiten hin gekennzeichnet.

Auf regionale Fazieswechsel innerhalb des Bereichs der Schaumkalkbänke wies bereits KOLB (1976) im Subherzyn-Becken hin. Die typischen Schaumkalke werden teilweise von dichten Kalken bis dolomitischen Kalken ersetzt. PATZELT (1988) beschreibt aus Nordwestthüringen das Äquivalent der Mittleren Schaumkalkbank als massig-bankigen, 1,35 m mächtigen Dolomitmergelstein. Untypische Faziesverhältnisse der Unteren und Mittleren Schaumkalkbank sind ebenfalls aus Oberdorla (Thüringer Becken) bekannt.

Die Grenze Unterer/Mittlerer Muschelkalk wird definitionsgemäß an die Oberkante der Oberen Schaumkalkbank (738,77 m) gelegt (Kap. 4.1).

5.4.2 Karlstadt-Formation (Abb. 14, Anl. 4, Taf. 29 - 31)

Das Gamma-Ray-Log der Bohrlochvermessung der Bohrung Remlingen 7 weist im Grenzbereich Unterer/Mittlerer Muschelkalk eine Messlücke auf, die sowohl den allerhöchsten Teil des Unteren Muschelkalks als auch die basalen Partien des Mittleren Muschelkalks bzw. der Karlstadt-Formation umfasst. Auch im Sonic-Log liegt für diesen Bereich keine kontinuierliche Messung vor, liegen hier doch das Ende bzw. der Beginn einer Messroutine. Für die Übertragung der an den Bohrkernen der Bohrung Remlingen 7 erarbeiteten Feingliederung des Mittleren Muschelkalkes auf andere Bohrungen

des Norddeutschen Beckens hat es sich hier als günstig erwiesen, dass eine nachträgliche Vermessung der Bohrkerne mit einem Gamma-Szintillometer durchgeführt worden ist.

Die sich im Hangenden der Oberen Schaumkalkbank anschließenden mikritischen, mergeligen Dolomite bis Dolomitmergelsteine werden der **Karlstadt-Formation (Zyklus I)** zugerechnet. Im Gamma-Ray-Log der Bohrkernvermessung ist die Basis des Mittleren Muschelkalks aufgrund dieses scharfen lithologischen Wechsels von den Peloid-Dolomiten der Oberen Schaumkalkbank zu den mikritischen, mergeligen Dolomiten der Karlstadt-Formation und der damit verbundenen Zunahme des Mergelanteils durch einen markanten Anstieg der natürlichen Radioaktivität gekennzeichnet.

Die Karlstadt-Formation (Zyklus 1) zeigt lithologisch eine deutliche Zweiteilung, die mit der Untergliederung in *orbicularis*-Schichten und Unterer Dolomit korreliert. Logstratigraphisch ist ebenfalls eine Zweiteilung dieses Abschnittes zu erkennen, wobei diese jedoch nicht mit der lithologischen Grenze *orbicularis*-Schichten/Unterer Dolomit zusammenfällt.

Die mergeligen Dolomite der *orbicularis*-Schichten an der Basis der Karlstadt-Formation zeigen eine deutliche, ebenflächige Feinschichtung im cm-Bereich. Im Gamma-Ray-Log zeichnen sie sich durch gleichbleibende Strahlungsintensitäten aus. Ihnen sind cm-mächtige Lagen von schwach mergeligen, peloid- und schillführenden Dolomiten zwischengeschaltet, die ein unruhiges Logbild mit einzelnen Gamma-Spitzen hin zu geringerer Gammastrahlung bedingen. Sulfate in Form von Anhydrit tritt feinverteilt knollig in der dolomitischen Grundmasse auf. Als konglomeratische Grenzbank wird eine 8 cm mächtige peloidführende Schillkalkbank (736,00 - 736,10 m) angesprochen, die im Liegenden siltig laminiert erscheint. Diese bildet die Hangendgrenze der *orbicularis*-Schichten, die sich jedoch im Gamma-Ray-Log nicht besonders deutlich abhebt.

Der Untere Dolomit wird von grauen mikritischen, mergeligen Dolomiten und Dolomitmergelsteinen aufgebaut, die deutlich geschichtet bis feinlaminiert sind. Die Laminationen sind eben bis unregelmäßig schwach wellig. Besonders im unteren Abschnitt sind geringmächtige (1 - 2 cm), graubraune, sandig-siltige Lagen charakteristisch. Sowohl im Gamma-Ray als auch im Sonic-Log ist eine deutliche Zweiteilung dieses Abschnittes zu erkennen. Ausdruck einer kontinuierlichen Zunahme des Mergelanteils in den Dolomiten im unteren Teil dieses Bereichs ist ein stetiger Anstieg der Gammastrahlungswerte. Einzelne Gammastrahlungsspitzen (Ausschläge nach rechts zu höheren Gamma-Werten) werden durch 1-2 cm mächtige Tonmergelsteinlagen hervorgerufen.

Der obere Abschnitt des Zyklus 1 beginnt mit einem Abfall im Gamma-Ray-Log, hervorgerufen durch eine Abnahme des Mergelgehalts der an der Basis auftretenden homogenen Dolomikrite. Bis ca. 1 m über der Basis steigt die Gammastrahlung leicht an. Es folgt ein Abschnitt mit wechselnder Gammastrahlung im dm-Bereich, charakteristisch für Wechsellagerungen von Dolomiten und Dolomitmergelsteinen. Innerhalb dieses Schichtabschnitts ist neben einer Abnahme des Mergelanteils eine Zunahme des Sulfatanteils in Form von cm-mächtigen Anhydritlagen und -knollen festzustellen, die eine Erhöhung der Laufzeiten im Sonic-Log sowie zusätzlich eine Abnahme der Gammastrahlung gegenüber dem unterlagernden Abschnitt hervorrufen. Im höchsten Teil des Zyklus 1 konnte ein im Sabkha-Milieu gebildeter Maschendraht-Anhydrit („chicken-wire“-) beobachtet werden. Diesem wird im Gamma-Log der Bohrkernvermessung eine Spitze geringerer Strahlungsintensität (G3 (A-D)) zugeordnet, wobei sich diese Spitze durch einen den Anhydrit über- und unterlagernden reinen Dolomit im Log gut abhebt.

Einzelne Bereiche sind durch Trockenrisse sowie intraformationelle Brekziierung gekennzeichnet. Lokal fand sich eine Rinnenbildung im cm-Bereich, gefüllt mit Lagen von detritischem Quarz.

Der Schillanteil geht innerhalb der Karlstadt-Formation vollständig zurück. Die Fossilführung beschränkt sich auf Vertebratenreste in Form von Knochen- und Fischschuppenfragmenten.

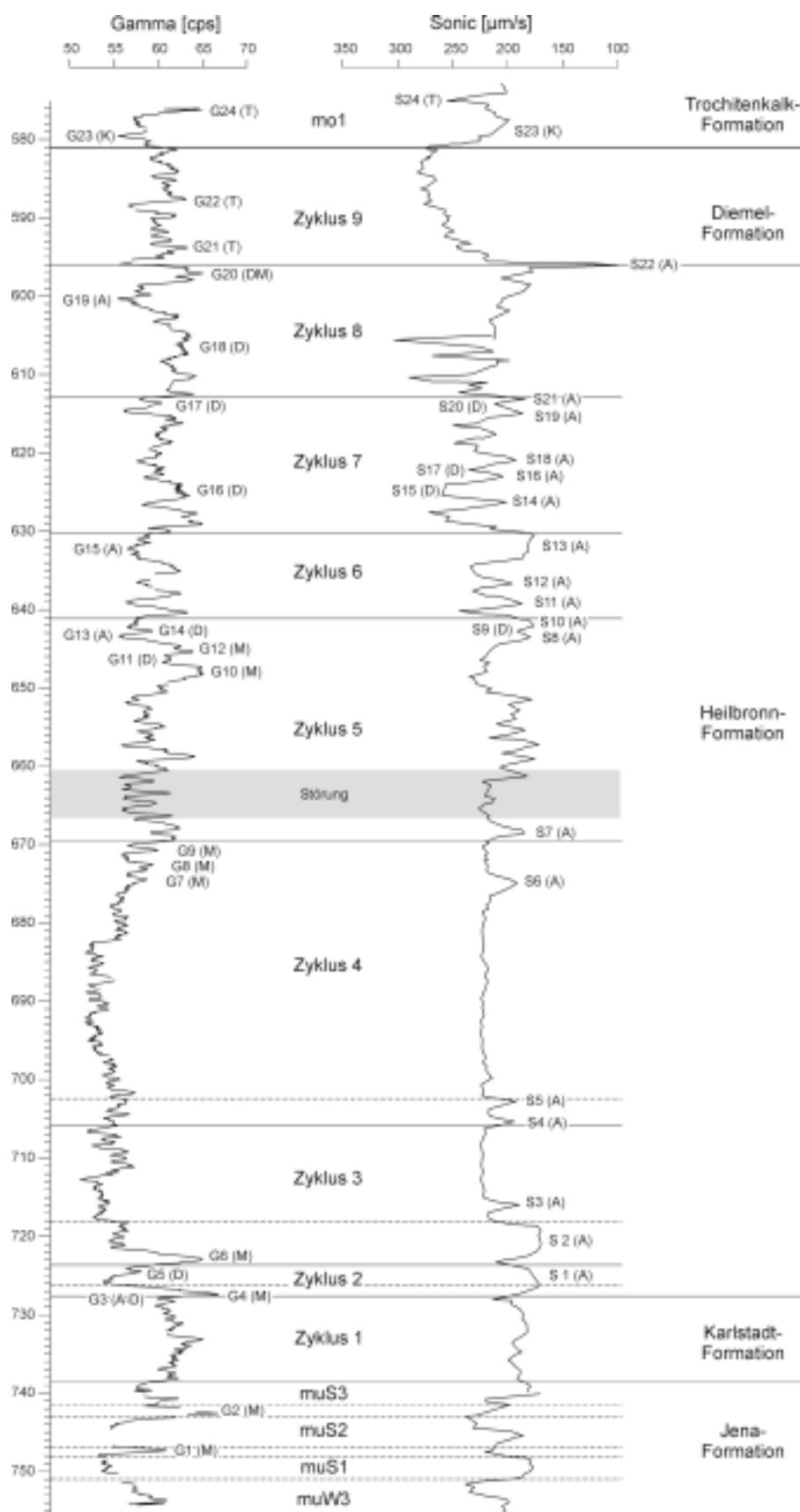


Abb. 14: Gamma-Ray-Log der Bohrkernvermessung und Sonic-Log der Bohrung Remlingen 7, markante Spitzen im Gamma-Ray- und Sonic-Log (G^* , S^*) wurden unter Einbeziehung der Lithologie (A: Anhydrit, M: Mergelstein, D: Dolomit, T: Tonstein) hervorgehoben.

5.4.3 Heilbronn-Formation (Abb. 14, Anl. 1 - 4, Taf. 29 - 4)

Zur Heilbronn-Formation wird der gesamte salinare Faziesbereich des Mittleren Muschelkalks zusammengefasst. Dieser wird im wesentlichen von mehr oder weniger mergeligem Dolomit, Anhydrit und Halit aufgebaut. In der Bohrung Remlingen 7 sind zwei Steinsalzlager ausgebildet, die durch ein Zwischenmittel voneinander getrennt sind. Die Heilbronn-Formation konnte mit Hilfe der Litho- und Logstratigraphie in 7 Zyklen (Zyklus 2 – 8) untergliedert werden.

Der die Heilbronn-Formation einleitende **Zyklus 2** des Mittleren Muschelkalks (727,60 m - 723,64 m) lässt sich sowohl litho- als auch logstratigraphisch deutlich zweiteilen. Der untere Abschnitt (727,60 m - 726,26 m) ist durch eine Wechsellagerung von Mergel- bis Dolomitmergelsteinen mit Anhydrit gekennzeichnet, während im oberen Abschnitt (726,26 m - 723,64 m) Anhydrit überwiegt. Im Gamma-Ray-Log wird die Basis des Zyklus 2 durch eine markante Strahlungsspitze (G4 (M)) charakterisiert, die auf einen hohen Anteil an tonigem Material innerhalb der Mergelstein-Anhydrit-Wechsellagerungen hinweist. Die einzelnen Lagen dieser Wechsellagerung erreichen dabei Dicken im mm- bis cm-Bereich. Intraformationelle Konglomerate wurden in einer ca. 5 cm mächtigen Mergelsteinlage beobachtet. Zum Hangenden dieses Abschnitts nimmt der Mergelgehalt ab, cm-mächtigen Dolomikritlagen sind schichtparallele geringmächtige Lagen von Anhydrit zwischengeschaltet. Damit verbunden ist eine allmähliche Abnahme der Gammastrahlung; die Gamma-Basisspitze (G4 (M)) des Zyklus 2 erhält dadurch einen relativ breiten Fuß. Der obere Abschnitt des Zyklus 2 wird von einem massigen Anhydrit aufgebaut und ist in den geophysikalischen Kurven durch geringe Gammastrahlung gekennzeichnet. Gleichzeitig zeigt er im Sonic-Log eine blockige Ausbildung mit niedrigen Laufzeiten (S1 (A)). Lagenweise enthält der Anhydrit feinverteilt dolomitisches Material oder unregelmäßig wellig-schlierigen, mehr oder weniger mergeligen Dolomit. Einzelne Bereiche enthalten deutliche Lagen von mergeligem Dolomit, die sich im Gamma-Ray-Log durch einzelne Strahlungsspitzen (G5 (D)) bemerkbar machen. Wulstschichtung („convolute bedding“), intraformationelle Brekziierung und „tepee“-Strukturen treten auf.

Die Grenze zum **Zyklus 3** (723,64 m - 705,75 m) ist durch eine lokale Winkeldiskordanz gekennzeichnet (Taf. 28/2). Dieser Profilabschnitt kann deutlich untergliedert werden. Der untere Abschnitt (723,64 m - 721,66 m) beginnt ähnlich wie beim Zyklus 2 mit einem Dolomit-Mergelstein-Anhydrit-Laminit, mit ebenschichtigen bis schwach welligen Lagen im mm- bis cm-Bereich. Auch im Logbild hebt sich die Basis des **Zyklus 3** ähnlich der des unterlagerten Zyklus 2 durch einen markanten Gammastrahlungsanstieg mit einer charakteristischen Strahlungsspitze (G6 (M)) ab, die ebenfalls durch einen breiten Fuß gekennzeichnet ist. Darüber folgen massive Anhydrite (721,66 m - 718,30 m), die im Liegenden (721,66 - 719,00 m) brekziert und im Hangenden (719,00 - 718,30 m) lagig ausgebildet sind und einen deutlichen Gammastrahlungsabfall bewirken. Im Sonic-Log sind diese durch einen Anstieg der Kurve nach rechts zu geringeren Laufzeiten deutlich erkennbar. Aufgrund seines blockigen Charakters bildet der Anhydrit im Sonic-Log einen guten und überregional verfolgbaren Korrelationsmarker.

Die Komponenten der Anhydritbrekzie bestehen aus feinlaminiertem bis massigem Anhydrit sowie aus mergeligem Dolomit. Mergelreiche laminierte Anhydrite sind oft deutlich deformiert und bilden Schlieren und kleingefaltete Lagen. Mergelige Dolomite liegen als Bruchstücke vor und werden von mergeligen Säumen umflossen. Der über den Brekzien folgende Anhydrit ist durch mm-mächtige Mergellagen ebenschichtig bis leicht wellig laminiert. In den obersten 5 - 10 cm sind einzelne mm-mächtige Salzlagen enthalten.

Der höchste Teil des Zyklus 3 wird von Steinsalz aufgebaut und ist durch einen weiteren Abfall der Gamma-Ray-Intensitäten charakterisiert. Dieser Bereich fällt durch geringe, gleichbleibende Gammastrahlung (< 10 API, „Schlumberger“-Kurve, Abb. 12) sowie durch konstante Laufzeiten auf. Diese liegen bei den für Steinsalz typischen Werten von durchschnittlich 220 µs/m. Die Basis des Halitla-

gers bildet eine ca. 11 cm mächtige, helle, massive Steinsalzlage. Die länglichen, klaren Halitkristalle stehen nahezu senkrecht und sind direkt auf der unterlagernden Anhydritlage aufgewachsen. Darüber folgt ein gering verunreinigtes, farblich gebändertes, körniges, feinkristallines Steinsalz. Die Korngröße bewegt sich im mm-Bereich. Mit einer scharfen Grenze schließt sich bei 716,43 m eine anhydritische Schichtenfolge an, lagig und in der Schichtung verteilt tritt Steinsalz auf. Im Sonic-Log ist dieser mehrere dm-mächtige, ins Steinsalz eingeschaltete Anhydrit anhand einer Laufzeitspitze (S3 (A)) in Richtung geringerer Laufzeiten deutlich zu identifizieren. Zum Hangenden gibt es einen kontinuierlichen Übergang in eine Zone mit meist grobkristallinem, mehr oder weniger stark verunreinigtem, hauptsächlich farblich gebändertem Steinsalz. Braune Farbtöne sind in diesem Abschnitt vorherrschend. Verunreinigungen bestehen größtenteils aus Anhydrit, ab Kernmeter 711,50 treten zunehmend dolomitisch-mergelige Verunreinigungen auf. Die Bänderung des Salzes liegt im cm- bis dm-Bereich. Die farbliche Bänderung wird durch eine lagenweise Anreicherung von Bröckchen und Fetzen von Dolomitmergelsteinen und Anhydrit hervorgerufen. Teilweise sind die Verunreinigungen in Form von horizontalen Säumen im mm-Bereich dem Salz zwischengeschaltet. Anhydrit und seltener Dolomitmergelstein bilden z. T. aber auch bis cm-mächtige Lagen. Die reineren helleren Lagen bestehen z. T. aus klarem Salz. Insgesamt weist der Zyklus 3 eine deutliche Dreiteilung auf, die die zyklische Entwicklung dieses Schichtpaketes von Dolomitmergelstein über Anhydrit zu Steinsalz widerspiegelt.

Die Grenze zum **Zyklus 4** (705,73 m - 669,46 m) ist durch das Auftreten eines schwach mergeligen Anhydritlaminitis gekennzeichnet. Die Basis des Laminitis ist gestört, ein Teil des Bohrkerns fehlt. Die Lamination liegt im mm-Bereich, sie ist flachwellig, schlierig ausgebildet. Feinkörniges Salz tritt in Lagen angereichert auf. Darüber folgt grobkristallines, anhydritisch-mergelig verunreinigtes Steinsalz, dem zum Hangenden hin zunehmend Anhydrit-Mergelstein-Lagen zwischengeschaltet sind. Massiger, mergeliger Anhydritlaminit bildet den Abschluss des basalen Abschnitts des Zyklus 4. Diesem Bereich wird im Sonic-Log eine markante Doppelspitze (S4 (A), S5 (A)) zugeordnet. Im Gamma-Ray-Log sind, bedingt durch die generell sehr geringe natürliche Radioaktivität von Anhydrit bzw. Steinsalz und dem geringen Mergelanteil im Anhydrit lediglich geringe Strahlungsausschläge vorhanden; die Gammastrahlung liegt relativ einheitlich bei Werten unterhalb von 10 API. Somit ist die Basis des Zyklus 4 in den Bohrlochmessungen der Bohrung Remlingen 7 nur mit Hilfe des Sonic-Logs sicher festzulegen.

Den oberen Abschnitt des Zyklus 4 bildet wiederum Steinsalz (702,52 m - 669,46 m), das in den Bohrlochmessungen die für Steinsalz typischen geringen Gammastrahlung sowie relativ gleichbleibende Laufzeiten aufweist. In den unteren Profilmeters dieses Abschnitts tritt grobkristallines bis kristallines, farblich gebändertes Steinsalz auf. Es ist relativ gering verunreinigt (5 - 10 %), jedoch finden sich vereinzelt anhydritische Brocken und Schlieren im Salz. Zum Hangenden nimmt der Grad der Verunreinigung des Salzes (bis ca. 25 %) allgemein zu, einzelne reine Steinsalzlagen treten jedoch immer wieder auf. Die Verunreinigungen sind anhydritisch sowie zunehmend dolomitisch-mergelig. Sie sind unregelmäßig schlierig und feinkörnig in der Salzmatrix verteilt. Während in der Gamma-Kurve der Bohrlochvermessung lediglich einzelne Gammaspitzen Hinweise auf mergelig-dolomitische Verunreinigungen geben, ist die Kurve der Bohrkernvermessung deutlich strukturiert. Es können einzelne Abschnitte identifiziert werden, in denen die tonig-mergeligen Verunreinigungen von unten nach oben abnehmen. Die Gamma-Kurve verschiebt sich leicht nach links zu geringeren Werten. Zum Hangenden des Zyklus 4 nimmt die lagige Anreicherung von Verunreinigungen im Salz zu. Das Salz ist farblich gebändert und wird von dolomitisch-anhydritischen Lagen, Brocken sowie Fetzen unterbrochen. Diese Zunahme an dolomitisch-mergeligen Verunreinigungen spiegelt sich auch in der Gamma-Kurve der Bohrkernvermessung wider, in der bei 682,2 m ein leichter Anstieg in den Strahlungsintensitäten zu verzeichnen ist. Von 673,83 m bis ca. 675,63 m ist ein Anhydrit-Mergelstein-Laminit ausgebildet, dem mm- bis cm-mächtige Steinsalzlagen zwischengeschaltet sind. Es finden sich hellbeige Zonen mit partiell herausgelöstem Anhydrit. Salzdrusen im mm- bis cm-Bereich, die durch Verdrängung des Sediments in diesem gewachsen sind, treten auf. Der Salzgehalt liegt bei ca. 15 %.

Klüfte sind mit rötlichem Steinsalz verheilt. In diesem Teufenbereich können sowohl im Gamma-Ray als auch im Sonic-Log deutliche Ausschläge beobachtet werden, die durch diese mächtigeren Anhydrit- bzw. Anhydrit-Mergelstein-Lagen und -Verunreinigungen (G7 (M), G8 (M), G9 (M), S6 (A)) hervorgerufen werden.

Die Grenze zum **Zyklus 5** (669,46 m - 641,16 m) liegt an der Oberkante des Steinsalzes des Zyklus 4. Das Steinsalz wird von einem grauen, feinkörnig-massigen und z. T. feinlaminierten Anhydritmergelstein überdeckt. Einzelne Bereiche mit Anhydritknoten konnten beobachtet werden. In den geophysikalischen Bohrlochmesskurven zeichnet sich die Basis des Zyklus 5 durch einen deutlichen Anstieg der Gammastrahlung aus. Wechselnde Anteile an Anhydrit und Mergelstein bewirken eine unruhige Gamma-Kurve mit einzelnen Strahlungsspitzen. Eine Sonic-Spitze in Richtung geringer Laufzeit bei ca. 668,4 m (S7 (A)) weist auf erhöhten Anteil an Anhydrit in diesem Bereich hin. Die darüber folgenden Anhydrit-Mergelstein-Laminiten zeigen ein deutliches Fließgefüge sowie Brekziierung. Unterbrochen werden diese Abschnitte von schlierigem Mergelstein mit feinkörnigem bis schlierigem Anhydrit. Zum Hangenden hin ist eine ebene Lamination ausgeprägt, einzelne Verfältelungen der Laminae sowie Wulstschichtung („convolute bedding“), teilweise oben gekappt, sind zu beobachten. Ähnlich dem unterlagernden Anhydritmergelstein zeichnet sich dieser Laminit in der Gamma-Kurve durch einen unruhigen Kurvenverlauf mit einzelnen geringmächtigen Strahlungsspitzen aus. Ein stark gestörter Bereich schliesst sich an (660,60 - 666,68 m). Typisch für diesen Schichtabschnitt sind mit rotem Fasersteinsalz verheilte Gesteinsbruchstücke im cm- bis dm-Bereich. Dabei handelt es sich um spröd zerbrochene, eckige Anhydrit-Mergelsteine sowie um Dolomit-Mergelstein-Laminiten. Bei ca. 664,63 m - 665,37 m tritt ein Bereich mit braunem, verunreinigtem Salz auf. Im Logbild zeigt dieser tektonisch gestörte Bereich aufgrund seines lithologischen Aufbaus aus verschiedenartigen, durch Steinsalz verheilten Gesteinsklasten vor allem im Gamma-Ray eine unruhiges Logbild mit deutlichen Strahlungsspitzen.

Die über diesem Störungsbereich folgende Schichtenfolge wird wiederum von Anhydrit-Mergelstein-Laminiten mit deutlichem Fließgefüge und teilweise Brekziierung, Mergelsteinbrekzien mit Anhydritknollen und -Knoten und Mergelstein-Anhydrit-Brekzien aufgebaut, so dass das Logbild durch einen engen Wechsel höher- und niedrigstrahlender Lagen gekennzeichnet ist. Der Anhydrit-Dolomitmergelstein-Laminit (653,15 m - 654,35 m) zeigt eine ebene bis schwach wellige Lamination. Daran schliesst sich eine Dolomitmergelstein-Anhydrit-Brekzie mit Komponenten aus Dolomikrit, feinlaminiertem Mergelstein und feinlaminiertem und knolligem Anhydrit an. Bei 649,33 m setzen Dolomit-Mergelstein-Laminiten ein, die eine ebene bis schwach wellige Lamination im mm- bis cm-Bereich aufweisen. In den geophysikalischen Kurven ist diese Schichtenfolge durch einen deutlichen Anstieg der Gammastrahlung (G10 (M)) und einen geringen Anstieg der Schall-Laufzeiten gekennzeichnet, wobei einzelnen Gamma-Spitzen Schichten mit höheren Mergelgehalten zugeordnet werden. Anhydrit ist in diesem Laminit lagig bis wolfig angereichert, intraformationelle dolomitische Konglomerate treten in unregelmäßigen Abständen in Lagen auf. Die Komponenten aus hellem Dolomikrit zeigen eine längliche, flache Form und sind gut gerundet („flat pebble“).

In einer Teufe von 645,5 m bis 646,8 m ist im Gamma-Ray-Log ein Abfall der Strahlungsintensitäten (G11 (D)) zu verzeichnen, der einer ca. 14 cm mächtigen Dolomit-Anhydrit-Wechsellsagerung, die zerbrochene Wulstschichtung aufweist, und einem darüber folgenden feinlaminierten Dolomikrit zugeordnet wird. Die mm-Laminationen sind eben bis wellig und werden durch einzelne Mergellaminae hervorgerufen. Homogene Dolomikritlagen werden bis zu mehrere cm mächtig. Die darüber folgenden stärker mergelig laminierten Dolomikrite zeigen im Gamma-Ray-Log gegenüber den unterlagernden Mikriten höhere Strahlungswerte (G12 (M)). Charakteristisch sind wiederum bis zu 4 cm mächtige Lagen aus intraformationellen „flat pebble“-Konglomeraten sowie z. T. anhydritisch gefüllten „mud cracks“. Synsedimentäre Klüfte sind ebenfalls anhydritisch verheilt und zeigen Versätze in cm-Bereich. Den mehr homogenen hellgrauen Dolomikritlagen im Hangenden (643,87 m - 644,43 m)

sind isolierte Anhydritknöllchen im mm-Bereich eingelagert. Es folgt eine ca. 3 cm mächtige Lage eines stark anhydritisierten Dolomikrits (643,87 m - 643,90 m). Der Anhydrit ist in der dolomitischen Grundmasse gewachsen und verdrängt diesen. Pyrit tritt feinverteilt körnig auf. Der sich anschließende mikritische Dolomit ist durch eine Anreicherung von Anhydritlagen bis zu einer Mächtigkeit von 1 cm gekennzeichnet. Diese dolomikritische Schichtenfolge korreliert im Gamma-Ray mit einem allmählichen Abfall der Gammastrahlung, bedingt durch abnehmende Mergelgehalte sowie die Zunahme des Anhydritgehaltes.

Mit einer scharfen Grenze (643,62 m) folgt darüber ein dunkelgrauer bis hellbrauner, feinlaminierter Anhydrit-Dolomit-Laminit, der sich in geophysikalischen Messungen durch Ausschläge im Sonic-Log nach rechts zu niedrigeren Laufzeiten (S8 (A)) bzw. im Gamma-Ray-Log nach links zu niedrigeren Strahlungswerten (G13 (A)) deutlich hervorhebt. Der Dolomitgehalt in diesem Schichtabschnitt beträgt max. 30 %. Die Lamination liegt im mm-Bereich und ist wellig bis überwiegend feinkräuselig ausgebildet. Die Anhydritlaminae zeigen meist eine flache ebene Basis und eine unregelmäßig wellige, kräuselige Oberfläche. Teilweise werden sie von cm-mächtigen Dolomitlagen überdeckt. Unterbrochen wird dieser Abschnitt von einem ca. 40 cm mächtigen, hellbraunen, laminierten Dolomit, in dessen Liegenden Kreuzschichtung ausgebildet ist, die durch in Schichtung eingeregelten klastischen Anhydrit hervorgerufen wird. Im obersten Teil dieses Abschnitts wird die Lamination des Anhydrits durch Dolomitmergelstein hervorgerufen. Dieser markante Horizont lässt sich sowohl im Gamma-Ray-Log der Bohrloch- als auch der Bohrkernvermessung einer Gamma-Spitze höherer Intensität (G14 (D)) sowie im Sonic-Log einer Spitze höherer Laufzeit (S9 (D)) eindeutig zuordnen, so dass der hangende Anhydrit des Zyklus 5 im Sonic-Log durch eine Anhydrit-Doppelspitze (S8 (A), S9 (A)) gekennzeichnet ist.

Die Grenze zum **Zyklus 6** (641,16 m - 630,21 m) liegt bei 641,16 m an der Basis eines Dolomitlaminit, wobei die Lamination durch Lagen von mm-mächtigem Anhydrit und sowie untergeordnet von Mergelstein hervorgerufen wird. Während diese Grenze zwischen dem liegenden Anhydrit des Zyklus 5 und dem basalen Dolomit des Zyklus 6 im Sonic-Log deutlich ausgeprägt ist und in einen Anstieg der Schall-Laufzeiten fällt, ist die Grenze im Gamma-Ray aufgrund der relativ geringen Strahlungsunterschiede von Anhydrit und Dolomit nur undeutlich ausgebildet. Bei 640,66 m folgt ein deutlicher Farbwechsel von beige-grau zu grau. Der Dolomit wird von Dolomitmergelstein abgelöst. Damit verbunden ist im Gamma-Ray ein Anstieg der Gammastrahlung. Charakteristisch für diesen Bereich sind Wechsellagerungen von anhydritisch laminierten Dolomitmergelsteinen, schwach laminierten Dolomitmergelsteinen, mergelig-dolomitisch laminierten Anhydriten und laminierten, massigen Anhydriten. Die Lamination bewegt sich im mm- bis cm-Bereich und ist eben bis stark kräuselig ausgebildet. An Sedimentstrukturen konnten Wulstschichtung („convolute bedding“), Trockenrisse („desiccation cracks“), Entwässerungsstrukturen und Rippelbildungen beobachtet werden. Geringmächtige Klüfte sind anhydritisch verheilt. Dieser Schichtabschnitt ist in den Messkurven durch einen unruhigen Logverlauf gekennzeichnet. Die unterschiedlichen lithologischen Anteile in diesen Wechsellagerungen lassen sich in den Logs sehr gut erkennen. Bereiche mit einem erhöhten Anhydritanteil (638,45 m - 639,50 m, 636,0 m - 637,0 m) sind durch charakteristische Sonic-Spitzen in Richtung geringerer Schall-Laufzeiten (S11 (A), S12 (A)) gekennzeichnet. Im obersten Bereich dieses Abschnitts findet sich ein feinlaminierter Anhydrit, der durch eine unruhige wellig-schliefelige bis kräuselige Lamination gekennzeichnet ist und einen durchschnittlichen Dolomitmergelgehalt von ca. 10 % besitzt. Dieser zeigt in den geophysikalischen Bohrlochmessungen einen ausgeprägt blockigen Charakter (G15 (A), S13 (A)). Die Gamma-Ray-Kurve der Bohrkernvermessung ist durch feineres Logpattern gekennzeichnet. Einzelne cm-mächtige Bereiche mit einem erhöhten Mergelanteil korrelieren in dieser Kurve mit einzelnen Strahlungsspitzen.

Darüber folgt mit einem deutlichen Anstieg der Schall-Laufzeiten sowie der Gammastrahlung der **Zyklus 7** (630,21 m - 612,86 m). Charakteristisch sind an der Basis des Zyklus 7 laminierte Dolomit-

mergelsteine. Die Lamination beruht zum einen auf einem Wechsel von mehr oder weniger mergeligen Dolomiten und zum anderen auf der Anreicherung von mm-mächtigen Tonmergelsteinlagen. Typisch sind eine ebene bis schwach wellige Feinlamination sowie vereinzelt auftretende intraformatio nelle Brekzierung und „mud cracks“. Anhydrit liegt meist lagig und untergeordnet in Form von Knöllchen feinverteilt in der Grundmasse vor. Während das Gamma-Ray der Bohrlochvermessung einen recht kompakten Charakter aufweist, zeigt die Kurve der Bohrkernvermessung einen unruhigen Verlauf mit deutlichen Strahlungsspitzen, die auf Mergel- und Tonmergelsteineinschaltungen zurück geführt werden. Es schließt sich bei 627,24 m eine Dolomitmergelstein-Anhydrit-Wechsellegerung an. Abschnittsweise treten bis zu bis 50 % Anhydrit auf. Aufgrund des z. T. hohen Anhydritanteils ist diese Wechsellegerung durch eine geringe Gammastrahlung und eine Laufzeitspitze in Richtung geringerer Werte im Sonic-Log (S14 (A)) gekennzeichnet. Als weitere Sedimentstruktur wurde Wulst schichtung mit erosiver Kappung beobachtet. Über einer wenigen mm-mächtigen, hämatitisierten Siltsteinlage folgt bei 625,30 m eine dolomitische Brekzie, die in den geophysikalischen Kurven durch erhöhte Schall-Laufzeiten (S15 (D)) sowie eine erhöhte Gammastrahlung (G16 (D)) charakterisiert wird. Die grauen Dolomitkomponenten liegen eckig bis gut gerundet vor. Sie werden durch mm-mächtige Tonsäume begrenzt. Überlagert wird diese Brekzie von einem massigen, z. T. schwach laminierten, mergeligen Dolomit. Charakteristisch sind Anhydritknöllchen und -lagen sowie Pyritnester. Der Pyrit ist teilweise hämatitisiert. Diese basale Schichtenfolge des Zyklus 7 ist gegenüber dem unterlagernden Zyklus 6 durch insgesamt höhere Laufzeiten charakterisiert, die Sonic-Kurve ist dadurch deutlich nach links verschoben. Ebenfalls wurden höhere Gammastrahlungswerte gemessen.

Zum Hangenden folgen Dolomitmergelstein-Anhydrit-Laminiten, in der Sonic-Kurve gekennzeichnet durch geringe Schall-Laufzeiten (S16 (A)), die von einem Dolomitmergelstein (622,53 m - 622,16 m) mit schwankenden Anteilen an wolkig verteiltem Anhydrit unterbrochen werden. Dieser Dolomitmergelstein macht sich in der Sonic-Kurve durch eine Spitze in Richtung höherer Laufzeiten (S17 (D)) bemerkbar, so dass der Dolomitmergelstein-Anhydrit-Laminit durch eine Doppelspitze (S16 (A), S18 (A)) geringerer Laufzeit gekennzeichnet ist. Die Lamination liegt im mm- bis cm-Bereich und ist eben bis wellig. Im Hangenden überwiegt die Feinlamination. Der Anteil der einzelnen Anhydrit- und Dolomitmergelsteinlagen schwankt. Die Lamination wird durch einen Wechsel des Mergelgehalts in den Dolomitmergelstein-Laminiten hervorgerufen. Synsedimentäre Tektonik mit geringfügigen Versätzen ist ebenso wie Wulstschichtung zu beobachten. Es schließen sich bei 620,43 m Dolomitmergelsteine bis Mergelsteine mit wolkig-fleckigen und lagig verteilten Anhydriten, massigen Anhydriten und Dolomitmergelstein-Anhydrit-Laminiten sowie laminierten Anhydriten an. Diese lassen sich ebenfalls in den geophysikalischen Kurven an Hand markanter Logspitzen verfolgen.

Den Abschluss des Zyklus 7 bildet wiederum ein laminiertes Anhydrit (612,86 m - 615,48 m), dem neben einzelnen cm-mächtigen Mergellagen in einer Teufe von ca. 613,35 m - 614,08 m ein Dolomit sowie ein Tonmergelstein (S20 (D), G17 (D)) zwischengeschaltet sind, die die Anhydritspitze im Sonic-Log deutlich zweiteilen (S19 (A), S21 (A)) und sich auch im Gamma-Ray der Bohrlochvermessung als Strahlungsspitze deutlich abheben. In der Gamma-Ray-Kurve der Bohrkernvermessung können einzelne Strahlungsspitzen mit Mergelsteinzwischenlagen korreliert werden.

Die Grenze zum **Zyklus 8** (596,15 m - 612,86 m) ist lithologisch unscharf (612,86 m). Deutlicher wird diese Grenze im Gamma-Ray- und Sonic-Log; die Kurven sind an der Basis des Zyklus 8 durch einen Anstieg der Gammastrahlung sowie auch der Laufzeiten gekennzeichnet. Im Bereich des Zyklus 8 liegt das Ende bzw. der Anfang einer Messroutine, so dass die Messkurven der Bohrlochvermessung kein für eine Interpretation optimales Logbild darstellen. Die Basis des Zyklus wird von Dolomitmergelstein-Laminiten und mergeligen Dolomiten mit einzelnen geringmächtigen Anhydritlagen aufgebaut, die sich im Gamma-Ray der Bohrkernvermessung durch leicht erhöhte Strahlungsintensitäten auszeichnen, wobei es im Gamma-Ray-Log bei ca. 609,75 m zu einer Abnahme der Strahlungsintensität kommt, die auf einen Rückgang des Mergelgehalts zurückgeführt wird; es treten laminierte, mer-

gelige Dolomite auf. Über einem durch abnehmende Gammastrahlung gekennzeichneten, anhydritisch dominierten Bereich aus Anhydrit-Mergelstein-Wechsellagerungen und einem feinwellig bis kraus laminierten Anhydrit folgt in einer Teufe von 601,45 m - 608,28 m ein schwach laminiert Dolomikrit mit tonig-mergeligen Säumen und Lagen. An der Basis findet sich brekziierter Dolomit mit einer anhydritischen Zementierung der einzelnen Komponenten. Typisch sind intraformationelle „flat pebble“-Konglomerate, Schrumpfungsrisse, anhydritisch gefüllte Entwässerungsstrukturen sowie im oberen Bereich dieser Schichtenfolge synsedimentäre Tektonik. Anhydrit wächst im Dolomikrit und bildet Knollen und Lagen.

Im Bereich 604,2 m - 607,5 m steigt der Mergelgehalt an. Der Dolomikrit erscheint deutlich mergelig laminiert und zeigt deshalb im Gamma-Ray-Log der Kernvermessung leicht erhöhte Strahlungsintensitäten (G18 (D)) mit einem gleichmäßig gezackten Logbild. Darüber lagern ab ca. 601,45 m dunkelgraue bis graue, feinlaminierte sowie massive, von Dolomitmergelsteinen durchsetzte Anhydrite, die im Gamma-Ray-Log durch einen Abfall der Strahlungsintensitäten gekennzeichnet sind. Es folgen bei ca. 598,30 m Dolomitmergelsteine mit deutlich intraformationeller Brekziierung und Fließgefüge sowie darüber Dolomit-Mergelstein-Laminite. Diese Abfolge korreliert im Gamma-Ray mit erhöhten Strahlungswerten (G20 (DM)). Im Hangenden des Zyklus 8 befindet sich in einer Teufe von 596,15 m - 597,20 m ein Dolomitmergelstein-Anhydrit-Laminit, der durch eine markante Logspitze im Sonic-Log (S20 (A)) charakterisiert wird und an dessen Oberkante die Hangendgrenze der Heilbronn-Formation gelegt wird. Die Obergrenze des Zyklus 8 ist somit durch das letztmalige Auftreten von sedimentärem Anhydrit charakterisiert.

5.4.4 Diemel-Formation (Abb. 14, Anl. 7, Taf. 4 - 2)

In der **Diemel-Formation (Zyklus 9, 581,06 m - 596,15 m)** setzt sich dann wieder die karbonatische Sedimentation durch. Die Liegendgrenze wird bei 596,15 m gezogen und liegt im Sonic-Log in einem Anstieg der Schall-Laufzeiten. Es treten vorwiegend beigebraune bis graue, laminierte bis geschichtete Dolomite auf. Eingeschaltet sind massive, homogene Dolomite. Insgesamt zeichnet sich der Zyklus 9 durch höhere Schall-Laufzeiten aus. Sowohl im Gamma-Ray als auch im Sonic-Log wird eine Zweiteilung dieses Profilabschnitts deutlich, die auch makroskopisch nachvollzogen werden kann.

Der an der Basis der Diemel-Formation auftretende massive, schwach geschichtete Dolomit enthält einige mm-mächtige konglomeratische Lagen, die als Komponenten Peloide, Bioklasten und Intraklasten enthalten. Die Lamination wird, wie auch in den anderen Abschnitten des Mittleren Muschelkalks, durch wechselnde Mergelgehalte sowie durch einzelne Tonmergelsteinlagen hervorgerufen. Im Gegensatz zu den laminierten Dolomiten im Liegenden ist eine intraformationelle Brekziierung für diesen Schichtabschnitt nicht typisch. Bioturbation im Bereich homogener Dolomite, Trockenrisse, Schrägschichtung und Rinnenbildung wurden beobachtet. Die für diesen Profilabschnitt des Mittleren Muschelkalks andernorts typischen, bis mehrere cm mächtigen Hornsteinlagen konnten in der Bohrung Remlingen 7 makroskopisch nicht beobachtet werden. Mikroskopisch wurden Verkieselungen in der Probe von 591,52 m - 591,59 m nachgewiesen. Bei Kernmeter 591,37 wurde ein ca. 1 cm mächtiges, sandig-siltig ausgebildetes Bonebed beobachtet. Auf der Schichtoberfläche sind Zweischaler, braune rhombische und oberflächlich gestreifte Fischschuppen, Pflasterzähne sowie langstengelige Pflanzenhäcksel angereichert. Gipsrosetten bis zu mehreren mm im Durchmesser und Hämatitflecken finden sich stellenweise. Zyklische Abfolgen (ca. 0,75 - 1,25 m mächtig) von Tonsteinen und Tonmergelsteinen an der Basis, darüber folgenden Mergelsteinen und Dolomit-Dolomitmergelstein-Laminiten bis hin zu massigen Dolomiten am Top treten auf. Diese lassen sich sehr gut im Gamma-Ray-Log der Bohrkernvermessung verfolgen. Innerhalb eines Zyklus nimmt die Gammastrahlung generell ab (Abb. 14). Einzelne geringmächtige Tonsteinlagen treten in der Gamma-Kurve als Strah-

lungsspitze (z. B. G21 (T)) deutlich hervor. Im Sonic-Log ist dieser basale Bereich des Zyklus 9 durch eine allmähliche Zunahme der Schall-Laufzeiten gekennzeichnet.

Zum Hangenden folgt bei 587,75 m über einer einige cm mächtigen Tonmergelsteinlage mit einem markanten Strahlungsanstieg in der Gamma-Kurve der Bohrkernvermessung (G22 (T)) ein ca. 1 m mächtiger Dolomit-Mergelstein-Laminit, der nach oben in wellig laminierte, z. T. knauerig ausgebildete Dolomite übergeht. Diese Abfolge ist mit einem geringen Strahlungsrückgang verbunden. Darüber folgen zwei Schichtabschnitte mit jeweils Dolomitmergelsteinen an der Basis, die im Gamma-Ray mit Strahlungsspitzen korrelieren sowie mikritischen, z. T. laminierten Dolomiten und Dolomitmergelsteinen am Top, so dass im Gamma-Ray-Log der Bohrkernvermessung nach oben jeweils ein Strahlungsrückgang zu verzeichnen ist. Im Sonic-Log ist diese Zyklizität aufgrund der groben Auflösung der Bohrlochmessung nicht zu erkennen. Die Strahlungswerte erscheinen relativ konstant. Ab einer Teufe von 584,7 m treten kalkigen Dolomite auf, die wechselnde Schill- und Peloidanteile zeigen, z. T. finden sich oolithische Lagen. Ab 581,55 m dominieren Calcite. Den Abschluss des Zyklus 9 bildet ein ca. 15 cm mächtiger grauer dolomitischer Kalkmergelstein.

5.4.5 Das Hangende des Mittleren Muschelkalks (Abb. 14, Anl. 1, Taf. 2 - 1)

Die Untergrenze der **Trochitenkalk-Formation** (Oberer Muschelkalk) wird durch eine ca. 6 cm mächtige graue Kalksteinbank markiert, die sowohl im Gamma-Ray als auch im Sonic-Log einen deutlichen Rückgang der Strahlungsintensitäten (G23 (K)) sowie der Schall-Laufzeiten (S23 (K)) hervorruft. Darüber folgt ein ca. 30 cm mächtiger flaseriger Knauerkalk, der von oolithischen sowie oolithisch-bioklastischen Kalksteinen überlagert wird, die in einer Teufe von 578,37 m - 578,67 m durch einen Knauerkalk unterbrochen werden. Stylolithen begrenzen die einzelnen Schichten. Zum Hangenden folgt ein Tonstein (G24 (T), S24 (T)), dem geringmächtige Kalkbänkchen eingelagert sind. In dieser Abfolge lassen sich einzelne Dachbankzyklen wiedererkennen. Insgesamt ist die Trochitenkalk-Formation gegenüber dem Mittleren Muschelkalk durch deutlich geringere Gammastrahlung sowie Schall-Laufzeiten gekennzeichnet. Die Bohrkernbearbeitung endet bei 575,76 m im Trochitenkalk.

5.5 Mikrafazies des Mittleren Muschelkalks in der Bohrung Remlingen 7

Die Gesteine des Mittleren Muschelkalks lassen sich aufgrund ihrer mikrafaziellen Merkmale in Fazieseinheiten entsprechend der Mineralogie unterteilen. Um eine gute Vergleichbarkeit mit den lithologischen Aussagen des Gamma-Ray- und Sonic-Logs zu erreichen, wurde eine vereinfachte Faziesunterteilung gewählt. Zusätzlich zur Karbonatfazies (Calcit- und Dolomitfazies) lassen sich die Gesteine einer Mergel-, Anhydrit- und Halitfazies zuordnen. Die Dolomitfazies bildet dabei die am weitesten verbreitete Gruppe. Im Unterem Muschelkalk sowie im Übergangsbereich zum Oberen Muschelkalk tritt die Calcitfazies auf.

5.5.1 Calcitfazies

Eine reine Calcitfazies, wie sie für die Gesteine des Unterem und Oberen Muschelkalks kennzeichnend ist, wurde in der Bohrung Remlingen 7 lediglich im Bereich des Trochitenkalks angetroffen. Für den obersten Abschnitt des Oberen Wellenkalks, den Bereich der Schaumkalkbänke sowie den obersten Abschnitt der Diemel-Formation ist eine teilweise bis vollständige Dolomitisierung der calcitischen Matrix typisch. Mikroskopisch und röntgendiffraktometrisch konnten so Kalke unterschieden werden, die nicht oder nur geringfügig dolomitisiert (Dolomitgehalt < 10 %) sind, und Kalke, die ne-

ben primärem Calcit mehr als 10 % Dolomit aufweisen. Die mikrofazielle Klassifikation erfolgte nach FOLK (1959) und DUNHAM (1962). Als Mikrofaziestypen treten in der Calcifazies Mikrite (Mudstone), Oobiosparite (Grainstone), Calcisilt-Laminite, Biopelsparite (Grainstone), Oobiomikrite (Wackestone) auf. Diese repräsentieren die Fazieszonen der Plattformrandsande (FZ6) sowie die offenen (FZ7) und geschlossenen (FZ8) Plattformbereiche sensu WILSON (1975) und FLÜGEL (1982).

5.5.1.1 Mikrite (Mudstone)

Reine Mikrite sind im obersten Abschnitt des Oberen Wellenkalks relativ häufig und repräsentieren den subtidalen Faziesbereich innerhalb einer Schelflagune (FZ7 nach WILSON 1975). Die Kristallgröße liegt allgemein im Bereich von 4 - 10 µm, kann aber auch infolge neomorpher Kristallvergrößerung im mikrosparitischen Bereich, bis 20 µm, liegen. In der Matrix sind weniger als 10 % Komponenten enthalten. Die Organismenreste sind dünnchalig und mikritisiert. Das Gestein zeigt keine Feinschichtung, vereinzelt konnten bituminöse Schlieren beobachtet werden, die als Bewegungsbahnen für dolomitisierende Lösungen fungierten. Die spätdiagenetischen Dolomite sind sub- bis euhedral ausgebildet. Der Dolomitgehalt beträgt bis zu 75 %.

5.5.1.2 Calcisiltlaminite (Taf.35/4)

Die Proben, die diesem Faziestyp zugeordnet werden können, weisen eine gut erhaltene Feinschichtung auf. Diese Laminite repräsentieren ein deutlich terrigen beeinflusstes Sediment des subtidalen Faziesbereichs innerhalb einer Schelflagune (FZ7 nach WILSON 1975). Eingelagerte Siltlagen von mm-Dicke zeichnen die Lamination nach. Die detritischen Quarzkörper und ein hoher Anteil an Glimmer treten sowohl diffus verteilt, als auch in Lagen angereichert in der Matrix auf. Die Basis einzelner Siltlagen ist scharf ausgebildet, fining upward ist kennzeichnend. Spät-diagenetische Dolomitierung konnte auch in diesem Faziestyp beobachtet werden.

5.5.1.3 Oobiosparit (Grainstone)

Dieser Mikrofaziestyp tritt nur im Trochitenkalk auf. Neben Ooiden sind nicht umkrustete Bioklasten typisch. Die Ooide sind rundlich bis oval geformt. Die Größe liegt allgemein bei 200 - 500 µm. Neben Ooiden, deren Schalen radialstrahlige Kristallstrukturen aufweisen, finden sich mikritisierte Ooide. Einzelne Ooide zeigen eine recht unregelmäßige Lagenstruktur, so dass sie Onkoiden ähnlich sind. Der sparitische Zement wird von Calcit, teilweise von Fe-Calcit und Anhydrit gebildet, vereinzelt findet sich eine calcitische Mikrit-Matrix. Spät-diagenetisch gebildeter Dolomit, in Form von sub- bis euhedralen Kristallen, findet sich vor allem im Bereich von Stylolithen. Teilweise sind Ooide dolomitisiert, wobei eine bevorzugte Dolomitierung der Ooid-Schalen erfolgte. Einzelne bis mehrere Dolomithomboeder treten auf, die die äußere Grenze der Ooide nur selten durchbrechen. Eine Barrierenwirkung scheint auch hier vorhanden zu sein (BACHMANN 1973). Die Ooide werden dem Ooid-Typ 1 „gut gerundete mikritische Ooide mit dünnen laminierten Hüllen“ und dem Ooid-Typ 3 „Ooide mit dünn laminierten, fein radialstrahligen Hüllen“ (STRASSER 1986) zugeordnet. Nach STRASSER (1986) lassen sich die Ooide des Purbeck des Schweizer Jura charakteristischen Environments zurechnen. Für die Typ 1-Ooide werden als Bildungsbereich tidal kontrollierte Sandbarren in einem marinen, hoch-energetischen Milieu, für die Typ 3-Ooide ein marines Ablagerungsmilieu, periodisch hoch-energetisch, angenommen. FLÜGEL (1982) beschreibt radialstrahlige Ooide als „Stillwasser-Ooide“, sowohl der marinen Randgebiete als auch des nichtmarinen Bereichs (z. B. hypersaline Küstenareale). Radialstrahlige Ooide werden jedoch auch oft als rein diagenetische Erscheinungen durch Umwandlung der ursprünglich tangential angeordneten Aragonitkristalle, angesehen (BACHMANN 1973). Neuere Beobachtungen an rezenten Ooiden sprechen dafür, dass auch bei Ooiden in Calciterhaltung die Radialstruktur ein primäres Merkmal darstellt (FLÜGEL 1982). Mit Hilfe von Pilzkulturen konnten

MONTY & VAN LAER (1984) im Experiment radiale Calcitoide erzeugen. Sie glauben auch in fossilen Ooiden Anzeichen für mikrobielle Tätigkeiten zu sehen und nehmen an, dass als Bildungsmilieu von Ooiden nicht Bereiche hoher Turbulenzen anzusehen sind, sondern ruhige Bereiche mit ausreichender Algen- und Pilztätigkeit. Hohe Turbulenzen können diese Ooide dann aufarbeiten und zu Ooidsanden zusammenschwemmen.

Als Ablagerungsbereich für die Oobiosparite dürfte auf Grund des Auftretens von sowohl normalen als auch radialstrahligen Ooiden ein mäßig exponierter Schwellenbereich mit mäßiger bis stärkerer Wasserbewegung, möglicherweise Schwellenflanken, in Frage kommen. Nach WILSON (1975) handelt es sich um die Fazieszone 6 – Bewegtwasser im Bereich von Untiefen. Gegenüber den Faziestypen des Mittleren Muschelkalks ist somit eine zunehmende Wasserenergie zu verzeichnen.

5.5.1.4 Oobiomikrit (Wackestone, Taf. 35/1, 35/5)

Oobiomikrite kommen ebenfalls nur im Trochitenkalk vor. Die mikritische Matrix mit Korngrößen von durchschnittlich 10 µm ist calcitisch, untergeordnet findet sich stellenweise spätdiagenetischer Dolomit sowie Calcit und Anhydritzement. Neben Ooiden zählen Schill und Bruchschill zu den ge steinsbildenden Komponenten. Typisch sind Phosphatreste. Der Komponentenanteil liegt bei über 10 % und ist starken Schwankungen unterworfen. Häufiger konnten Stylolithen beobachtet werden, die meist parallel zur Schichtung verlaufen und als Vertikalstylolithen (BEIERSDORF 1968) bzw. stratiforme Stylolithen (FRIEDEL 1995) bezeichnet werden. Stylolithen entstehen durch Drucklösung, charakteristisch sind Anlösungserscheinungen an den Komponenten (Ooide, Schalenreste) sowie tonmineralfreien Säume, die geringer lösliche Residualsubstanzen enthalten. Nach FRIEDEL (1995) treten Stylolithen mit großen Amplituden bevorzugt in partikelreichen Kalken auf, in stärker sparitisch zementierten, häufig bioklastreicher Kalken sind diese seltener.

Dieser Faziestyp wird dem flachen Subtidal zugeordnet (Fazieszone 7 – offene Plattform nach WILSON), in dessen Nähe Oolithbarren zu finden sind.

5.5.1.5 Biopelsparit (Grainstone)

Sowohl im Bereich der Schaumkalkbänke wie auch im oberen Abschnitt des Zyklus 9 (Diemel-Formation) treten Biopelsparite auf. Peloide dominieren im Bereich der Schaumkalkbänke und im unteren Teil des oberen Abschnitts der Diemel-Formation und gehen in Richtung Trochitenkalk anteilmäßig zurück, wobei eine Zunahme an Bruchschill beobachtet wird.

Die Peloide sind aus mikrokristallinem Calcit aufgebaute strukturlose Körner mit rundlich-ellipsoiden Formen. Sie erreichen Größen bis zu 200 µm; die durchschnittliche Größe liegt bei 80 - 100 µm. Ihre Genese kann sehr unterschiedlich sein. Peloide sind ihrem Ursprung nach Kotpillen („fecal pellets“), Kalkalgenbildungen (Algenpeloide), mikritisierte Bioklasten (Bahamitpeloide) oder aber auch aufgearbeitete Kalkschlammklasten (Miniresidimente, Pseudopeloide). Der Hauptanteil der Peloide wird den Pseudopeloiden zugeordnet.

Die dolomitische Grundmasse ist durch Dolopseudosparit (neomorpher Dolosparit) gekennzeichnet. In unterschiedlichem Maße finden sich calcitisch-mikritische Reliktstrukturen. Die Dolomitkristalle sind sub- bis euhedral ausgebildet, die Rhomboeder erreichen Kristallgrößen bis zu 100 µm, durchschnittlich sind 20 - 40 µm typisch. Die massigeren, kompakt erscheinenden Partikel sind calcitisch. Dies spricht für eine spätdiagenetische Dolomitierung der Karbonate mit einer bevorzugten Dolomitierung der mikritischen Matrix gegenüber diesen kompakteren Komponenten. Im Bereich der Oberen Schaumkalkbank ist die Grundmasse vollständig dolomitisiert. Eine besondere Rolle bei der Dolomitierung des Sediments spielt die Wegsamkeit. Schwach tonführende Lagen sowie Stylo-

lithen unterstützen die Wegsamkeit und konnten als Bereiche bevorzugter Dolomitisierung identifiziert werden.

Peloide sind ein bedeutender Bestandteil der flachmarinen Sedimentation und bilden typische Sedimente flachmariner, niedrig-energetischer, restrikt-mariner Ablagerungsräume. Rezente Beispiele hierfür sind die Pellet-Mud-Fazies der Great Bahama Banks westlich der Andros Islands sowie die Peloidal-Fazies der Trucial Coast (TUCKER & WRIGHT 1990).

Der Faziestyp der Biopelsparite repräsentiert den lagunären Faziesbereich im Grenzbereich Inter-/Subtidal mit überwiegend Stillwasserbedingungen, Standardmikrifazies (SMF)-Typ 16 der Fazieszonen 7 und 8 – Schelf mit herabgesetzter Wasserzirkulation und Gezeitenflächen (WILSON 1975).

5.5.2 Dolomitfazies

Zur Dolomitfazies werden Gesteine zusammengefasst, deren Karbonatanteil vollständig dolomitisiert ist. Entsprechend ihrem Anteil an unlöslichem Rückstand lassen sich Dolomite und mergelige Dolomite unterscheiden, wobei letztere überwiegen. Als Mikrofaziestypen werden Dolomikrit (Mudstone), Dolomikrosparit/Dolosparit (Mudstone), Algenlaminit (Bindstone), Dolosiltlaminit, Dolopelmikrit bis Dolobiopelmikrit (Wackestone) unterschieden. Diese repräsentieren die Fazieszonen der abgeschlossenen Plattformbereiche (FZ 8) sowie der Plattform-Evaporite (FZ 9).

5.5.2.1 Dolomikrit (Mudstone, Taf. 36/6)

Dolomikrite sind gekennzeichnet durch homogenes, gleichkörniges Gefüge aus sub- bis euhedralen Dolomitkristallen. Die Gesteine sind hellgrau bis grau gefärbt, strukturlos und enthalten keine oder nur sehr wenige (< 10 %) Komponenten. Vereinzelt finden sich Peloide und biogene Komponenten. Die Kristallgröße liegt allgemein zwischen 5 -10 µm, aufgrund neomorpher Kristallvergrößerung stellenweise bis 20 µm. Die Kristallgröße ist allgemein sehr gleichförmig. Der Gehalt an unlöslichem Rückstand (IR), feinverteilt in der mikritischen Matrix, schwankt deutlich. Neben Dolomiten mit einem Karbonatgehalt von über 90 % finden sich Dolomite, in denen die Gehalte an IR über 25 % betragen können. Anhydrit in Form von kleinen rundlich-ovalen Knötchen oder unregelmäßigen Flecken konnte in allen Proben nachgewiesen werden. Ihre Entstehung wird als frühdiagenetische Bildung durch Verdrängung von Dolomit durch CaSO₄ gedeutet. Pyrit tritt als authigene Bildung körnig und in Form von Fetzen feinverteilt in der Matrix auf. Dies weist auf den anaeroben Chemismus der mineralisierenden Lösungen hin. Im Gegensatz dazu wird die Bildung von Eisenoxiden, die an Stylolithensäumen beobachtet werden können, auf oxidierende Wässer zurückgeführt.

Die Dolomikrite werden als niedrig-energetische Ablagerungen im Intertidal bis flachen Subtidal gedeutet.

5.5.2.2 Dolomikrosparit/Dolosparit (Mudstone, Taf. 35/7, 35/8, 35/9, 36/2)

Gegenüber dem Mikrofaziestyp des Dolomikrits zeichnet sich der Dolomikrosparit/Dolosparit durch Kristallgrößen von durchschnittlich 25 µm aus, mit Schwankungen im Bereich von 10 - 50 µm. Die Dolomitkristalle sind sub- bis euhedral ausgebildet. Das Gestein ist strukturlos und arm an Komponenten. Vereinzelt finden sich Peloidlagen. Ähnlich wie für die mikritischen Kalke beschrieben, schwankt der IR deutlich. Spätdiagenetische Dolomitierungsprozesse sind für seine Entstehung verantwortlich, so dass die primären Kristallgrößen und -formen sowie das Gefüge nicht mehr erkennbar sind. Es wird angenommen, dass der Großteil dieses Faziestyps aus Dolomikrit hervorgegangen ist.

5.5.2.3 Algenlaminit (Bindstone, Taf. 35/2, 35/3)

Eine ausgeprägte horizontale, ebene bis feinwellige Lamination, bedingt durch den Wechsel von organisch-bituminösen Laminae und Dolomit, ist für den Mikrofaziestyp der Algenlaminiten charakteristisch. Deutliche Farbunterschiede kennzeichnen die Lamination, hellgraue und graue bis dunkelgraue mm-mächtige Lagen sind typisch. Die Dolomite sind mikritisch mit Kristallgrößen von allgemein 5 µm. Der Gehalt an IR liegt bei 10 - 20 %. In den Algenlaminiten treten Anhydritknötchen und amöboide Anhydritkristalle auf, was in einem Anhydritgehalt bis zu 6 % zum Ausdruck kommt.

Algenlaminiten werden auf sedimentfangende und -bindende filamentöse und einzellige Mikroorganismen, meist Cyanobakterien, zurückgeführt und können auch als Kryptalgenlaminiten bezeichnet werden. Nach FLÜGEL (1982) entstehen Algenlaminiten im Inter- und Supratidal sowie im oberen Subtidal. Algenlaminiten mit feinwelliger Lamination und demzufolge geringem Relief werden als niedrig-energetisch entstanden gedeutet (HOFFMANN 1976). Die Algenlaminiten der Bohrung Remlingen 7 werden als intertidale bis supratidale Ablagerungen angesehen. Indizien dafür sind die Lamination, eine fehlende Bioturbation sowie die im Dolomit gewachsenen Anhydritknoten.

5.5.2.4 Dolosiltitlaminit (Taf. 35/2, 35/6)

Dolosiltitlaminiten repräsentieren ein deutlich terrigen beeinflusstes Sediment. Charakteristisch ist Feinschichtung; Quarzsiltlagen zeichnen die Lamination nach und wechseltlagern mit Dolomikrit im mm-Bereich. Die Basis der einzelnen Siltlagen ist wie auch beim Calcisiltitlaminit deutlich ausgebildet, Gradierung (fining upward) konnte ebenfalls beobachtet werden. Dickere Lagen sind teilweise anhydritisch zementiert. Die Dolomitgehalte sind starken Schwankungen unterworfen und liegen zwischen 50 - 80 %. Es wird ersichtlich, dass einzelne Proben dieses Faziestyps der Mergelfazies zugerechnet werden müssten. Aufgrund der einheitlich mikritischen Dolomitmatrix werden die Dolosiltitlaminiten jedoch der Dolomitfazies zugeordnet. Die Dolosiltitlaminiten sind oft mit Algenlaminiten vergesellschaftet. Sie repräsentieren demnach Ablagerungen des intertidalen bis supratidalen Faziesbereichs.

5.5.2.5 Dolopelmikrit bis Dolobiopelmikrit (Wackestone, Taf. 36/8)

Dieser Faziestyp tritt in allen dolomitisch geprägten Bereichen des Mittleren Muschelkalks zu finden. Die dolomitische Grundmasse ist mikritisch ausgebildet. Die Kristallgröße liegt wie beim Dolomikrit zwischen 5 - 10 µm, sowie stellenweise bei 20 µm. Der Peloid- bzw. Peloid-Biogenanteil liegt bei über 10 %. Die Peloide mit Größen von 40 - 200 µm werden von mikritischen Körnern aufgebaut. Sie werden als Algenpeloide gedeutet. Gegenüber der dolomitischen Matrix zeichnen sich die Peloide lediglich durch eine deutlich dunklere Färbung aus. Sie finden sich in Lagen zusammen mit Quarzkörnern und z. T. Bioklasten angereichert, untergeordnet aber auch nesterartig dicht gepackt. Das bevorzugte Auftreten der Peloide in Laminae, sowie deren Zusammenvorkommen mit terrigenen Komponenten lassen auf aufgearbeitete Sedimente („Miniresedimente“, FLÜGEL 1982) schließen.

5.5.3 Anhydritfazies

Die sulfatischen Bestandteile im Mittleren Muschelkalk der Bohrung Remlingen 7 liegen in anhydritischer Ausbildung vor. Es ist davon auszugehen, dass Gips als primäres Calciumsulfat-Mineral ausgefällt wurde und die Bildung von Anhydrit durch Dehydratation von Gips erfolgte. Es handelt sich hier um frühdiagenetisch-sedimentäre Anhydrite, wobei diese die Phasenumwandlung Gips/Anhydrit unter Erhaltung des primären Gefüges durchlaufen haben. Demnach stellen die Anhydrit-Mikrogefüge pseudoprimarye Bildungen dar. Nach LANGBEIN (1983, 1984) befinden sich diese Calciumsulfate im Stadium der progressiven Diagenese.

LANGBEIN (1979) und BALZER (1997) unterscheiden auf der Basis mineralogischer Merkmale fünf Anhydrit-Strukturtypen (A-E, Abb. 15), wobei jeder Strukturtyp eigenständig oder in Verwachsung mit mehreren verschiedenen Kristallstrukturen auftreten kann. Die Kristallformen des Anhydrits im Mittleren Muschelkalk entsprechen in ihren Kornstrukturen dem leistenförmig-tafeligen sowie dem isometrisch-kristallotopischen Typ. Als weitere Mikrostrukturen sind der isometrisch-granulare (granotopische), der fibröse und der amöboide Strukturtyp zu nennen.

Der Wechsel in der Anhydritmorphologie von prismatischem zu schlankem nadeligem Anhydrit reflektiert einen abnehmenden pH-Wert mit zunehmender Konzentration der Laugen (WIDMER 1991). Nach LANGBEIN (1979) zeigt der schlanke Anhydrittyp hochsalinare Bildungsbedingungen bzw. eine frühdiagenetische Umwandlung unter hochsalinaren Bedingungen an.

An Faziestypen werden feinkristalliner Anhydrit, Anhydritlaminit, Dolomit-Anhydrit-Rhythmit, massiver Anhydrit ausgehalten.

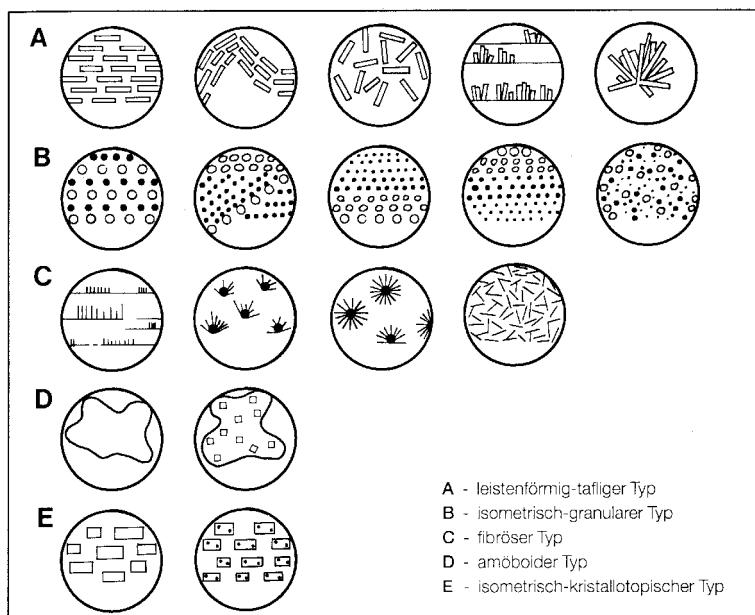


Abb. 15: Schema der Mikrostrukturen von Anhydritgesteinen (LANGBEIN 1979)

5.5.3.1 Feinkristalliner Anhydrit (Taf. 36/4)

Die feinkörnige anhydritische Grundmasse zeigt leistenförmig-tafelige bis isometrisch- granulare (granotopische) Strukturen. Typisch sind bituminös-karbonatische Gemengteile, die z. T. schlierig auftreten. Dolomithomboeder bis zu 50 µm treten vereinzelt feinverteilt in der Grundmasse auf. Teilweise kommen massive wolkige Anhydritlagen vor, die unregelmäßig flaserig bis knollig ausgebildet sind. Die relativ hellen, grauen Knoten haben unregelmäßig rundlich-ovale Formen und erreichen Größen von bis zu 1 mm. Sie zeichnen sich durch isometrisch-kristallotopische bis tafelige Mikrostrukturen aus. Die einzelnen Knollen werden durch bräunliche Säume gegeneinander abgegrenzt. Diese werden ebenfalls von Anhydrit aufgebaut. Gegenüber den Knollen überwiegt der leistenförmig-tafelige Strukturtyp, untergeordnet finden sich isometrisch kristallotopische Mikrostrukturen. In den Zwickeln zwischen den Leisten findet sich Dolomikrit mit Kristallgrößen von ca. 2 µm. Der Dolomitgehalt liegt in diesem Faziestyp unter 10 %.

5.5.3.2 Dolomit-Anhydrit-Rhythmit

Dieser Lithofaziestyp ist durch Wechselleagerungen von Anhydritlagen mit Dolomikrit gekennzeichnet. In einzelnen Proben zerfallen die dolomitischen Lagen krümelig in rundliche bis unregelmäßige Partikel.

ßig geformte mikritische braune Komponenten, die kleinen Peloiden ähneln. Diese Komponenten werden als Algenkügelchen gedeutet, möglicherweise handelt es sich auch um zerfallenes Algenmaterial. Diese Algenkügelchen bilden separate Lagen, sind aber auch innerhalb der Anhydrite zu finden.

5.5.3.3 Anhydritlaminit (Taf. 36/3, 36/5, 36/9, 36/10)

Der Anhydritlaminit zeichnet sich durch Dolomit-Anhydrit-Wechsellegerungen aus. Die Dicke der einzelnen Lagen liegt im mm- bis cm-Bereich. Gradierte Anhydritlagen sind häufig zu finden. Die Anhydritkristalle sind in diesen Lagen leistenförmig-tafelig ausgebildet, ihre Größe und Packungsdichte nimmt zum Hangenden kontinuierlich ab. Die Basis der Anhydritlagen ist meist scharf ausgebildet, die Anhydritleisten sind allgemein schichtungssparallel, teilweise aber auch wirr eingeregelt. Gegen oben nimmt der Dolomitannteil deutlich zu. Die Anhydritkristalle liegen im mikritischen Dolomit teils schichtparallel, teils ungeordnet. Einzelne senkrecht stehende Leisten sind zu beobachten. Ein gradueller Übergang von Anhydrit zu Dolomit deutet auf eine plötzliche Bildung von Gips als Folge einer periodisch auftretenden Übersättigung hin. Zum Hangenden hin geht die Sulfatbildung zurück, die Konzentration der Lauge fällt aufgrund der Kristallbildung gegen die Sättigungsgrenze ab.

5.5.3.4 Massiver Anhydrit (Taf. 36/7)

Im Gegensatz zum Anhydritlaminit sind die dolomitischen Verunreinigungen in diesem Faziestyp in einer Grundmasse von Anhydrit feinverteilt. Dabei kann der Anteil an Dolomit stark zunehmen und z. T. sogar überwiegen, so dass man auch von einem Anhydrit-Dolomit-Faziestyp sprechen kann. Die Anhydritkristalle sind allgemein isometrisch granular ausgebildet und zwischen 10 bis 30 µm groß. In dolomitreicheren Partien dagegen dominieren leistenförmig-tafelige Kristalle. Die Dolomite sind stets mikritisch ausgebildet. Häufig treten massive wolkige oder auch gebänderte Anhydrite auf. Wolkige Anhydrite zeigen eine flaserig-knollige Ausbildung. Die nur wenig verunreinigten Knoten können eine Größe von bis zu 4 mm erreichen. Sie zeigen einen länglich ovalen Umriss. Lokal sind dolomitische Verunreinigungen durch Verdrängung in feinen, geschwungenen Säumen konzentriert worden. Gebänderte Anhydritlagen unterscheiden sich in ihrer Ausbildung nicht von den wolkigen Anhydritlagen. Lediglich die fein verteilten dolomitischen Verunreinigungen sind horizontgebunden. Stellenweise finden sich bis zu 0,5 mm große idiomorphe Dolomitrhomboeder, die z. T. einschlusstreiche, zonierte Zentren aufweisen sowie reliktischen Anhydrit enthalten.

5.5.4 Mergelfazies

Mergel und Tonmergel repräsentieren eine wichtige Faziesgruppe innerhalb des Mittleren Muschelkalks. In der Bohrung Remlingen 7 besteht die Tonfraktion, die röntgendiffraktometrisch bestimmt wurde, zum überwiegenden Teil aus Illit und Chlorit. Neben einer detritischen Herkunft der Tonminerale wird vor allem für den Chlorit eine authogene Bildung durch die Reaktion von detritischen Tonen mit Mg-reichen Laugen angenommen. GRIMM (1951) ging dabei von einer Umwandlung von Kaolinit in Chlorit aus. LIPPmann & PANKAU (1988) sehen Kaolinit ebenfalls als Ausgangsmineral zur Chloritbildung an. Während Kaolinit im Oberen Muschelkalk Süddeutschlands eine bedeutende Rolle spielt (LIPPmann & SCHLENKER 1970), fehlt er in der Tonmineralparagenese des Mittleren Muschelkalks, wenngleich eine wesentliche Änderung der detritischen Zufuhr in diesem Zeitabschnitt nicht angenommen wird. LIPPmann & PANKAU (1988) führen die Neubildung des Chlorits jedoch nicht in erster Linie auf eine durch Eindampfung erhöhte Mg-Konzentration zurück, vielmehr sehen sie diese als „Anzeiger der Wirksamkeit von lakustrisch konzentrierter Alkalinität, die beim Einfließen in normal marine Becken nicht in Silikatumwandlung eingreifen könnte, weil sie in normalem Meerwasser sofort durch Karbonatfällung unwirksam würde“. Die Mg-haltigen Tonminerale können somit nach LIPPmann & PANKAU (1988) als Ergebnis der Einwirkung alkalischer Lösungen kontinentaler

Herkunft auf die im eingeschnürten Becken des Mittleren Muschelkalks enthaltene Tonfraktion angesehen werden. Die gleiche Tonmineralparagenese beschrieb NIEMANN (1960) aus den grauen Salztonen des Zechsteins von Reyershausen.

Die Quarzfaktion liegt meist im Siltbereich; der Quarzgehalt ist großen Schwankungen unterworfen. Quarzanreicherungen finden sich feinverteilt in der Matrix sowie als eingelagerte Feinsandlagen vor allem im mm-Bereich. Einzelne braungraue Siltlagen bis 1 cm Mächtigkeit im mittleren Abschnitt des Zyklus 9 weisen Bonebed-Charakter auf. Anreicherungen von Fischschuppen, Zähnen, Pflanzenhäckseln sowie Zweischalern sind kennzeichnend, teilweise überwiegen jedoch Intraklasten.

Die Karbonatfraktion wird von Dolomit aufgebaut. REM-Untersuchungen belegen einen mikritischen Dolomit mit sub- bis euhedralen Kristallen.

5.5.5 Lithofazies des Steinsalzes

Röntgendiffraktometrische Untersuchungen erlauben halbquantitative Aussagen zu Verunreinigungen des Steinsalzes. Innerhalb des Steinsalzes findet sich vor allem Anhydrit. Untergeordnet treten Tonminerale, Polyhalit sowie Dolomit auf. Während im allgemeinen die mit Halit assoziierten Tonminerale in evaporitischen Umgebungen magnesiumreich sind, mit einer Zunahme an Mg zum Beckenzentrum hin, wurde in den Haliten lediglich Illit nachgewiesen. Dieser wird allgemein als detritische Komponente angesehen. Die von REBELL & STEMPFL (pers. Mitt.) beschriebenen Agglomerate von Markasit im Steinsalz des Mittleren Muschelkalks der Bohrung Remlingen 7 konnten nicht nachgewiesen werden.

Das Steinsalz der Bohrung Remlingen 7 wurde anhand makroskopischer Kriterien unterschieden. In Anlehnung an WIDMER (1991) wird das Steinsalz sieben Salzklassen zugeordnet. Zu den Unterscheidungskriterien zählen dabei die Kristallgröße und -form, der Anteil und die Art an Verunreinigungen sowie charakteristische sedimentäre und diagenetische Strukturen. Folgende Salzklassen wurden unterschieden:

Salzkasse 1: Steinsalz mit vertikal elongierten Kristallen: Dieser Salztyp findet sich in Bereichen, in denen Lagen von Dolomitmergeln und Anhydrit auftreten. Die Kristallgröße der vertikal elongierten Kristalle mit deutlich primären Wachstumsformen erreicht lokal mehrere cm. Verunreinigungen (Anhydrit, Dolomit und Ton) zeichnen die Kristallgrenzen nach. Häufig wechseltlagern verunreinigte Bereiche mit elongierten Kristallen mit klaren relativ sauberen Abschnitten.

Salzkasse 2: grobkristallines, hell-dunkel gebändertes Steinsalz: Für diesen Salztyp ist eine farbliche Hell-Dunkel-Bänderung im cm- bis dm-Bereich, hervorgerufen durch eine lagenweise relative Häufung von Verunreinigungen (Mergel, Dolomit, Anhydrit) in Form von Bröckchen und Fetzen sowie teilweise horizontalen mm-mächtigen Laminae kennzeichnend. Die Kristallgröße liegt im cm-Bereich. Lagen von Anhydrit und Dolomitmergeln im cm-Bereich sind zwischengeschaltet.

Salzkasse 3: körniges und feinkristallines Steinsalz: Dieser Salztyp wird durch seine Korngröße im mm-Bereich definiert. Dieses graue, milchigweiße Steinsalz ist in der Regel wenig verunreinigt. Feine Mergelbröckchen sind homogen verteilt.

Salzkasse 4: grobkristallines, wenig verunreinigtes Steinsalz: Dieser Steinsalztyp beinhaltet Steinsalz mit Kristallgrößen im cm- Bereich. Primäre Wachstumsformen oder Schichtungen sind nicht erkennbar. Der Anteil an Verunreinigungen erreicht maximal 10 %.

Salzkasse 5: grobkristallines, stark verunreinigtes Steinsalz: Das Steinsalz dieses Salztyps entspricht dem der Salzkasse 4. Der Anteil an Verunreinigungen erreicht 10 - 50 %.

Salzkasse 6: Salzkuben und -drusen im Sediment: Diese Salzkasse wird durch mm- bis cm-große Salzdrusen und idiomorphe Salzkuben charakterisiert, die durch Verdrängung im Sediment gewachsen sind. Der Salzgehalt liegt unter 50 %.

Salzkasse 7: Fasersalz: Fibröses, rötlich- und orangefarbenes Steinsalz ist für diese Salzkasse kennzeichnend. Die Färbung wird durch Eisenbeimengungen hervorgerufen. Das Salz findet sich als Kluftfüllungen in spröd zerbrochenem Anhydrit und in Dolomitmergeln.

In der Bohrung Remlingen 7 ist vor allem grobkristallines Salz (Klasse 2, 4, 5) verbreitet. Daneben tritt feinkristallines Steinsalz, das rote Fasersalz, Salzdrusen und Salzkuben im Sediment sowie untergeordnet vertikal elongiertes Steinsalz auf. Das rote Fasersalz ist an den Störungsbereich in der Teufe von 660,60 m - 666,68 m gebunden. Spröd zerbrochene Anhydrit-Mergelsteine und Dolomit-Mergel-Laminiten sind durch das Fasersalz miteinander verheilt sowie z. T. durch Steinsalz an ihren Rändern angelöst (s. Taf. 17 - 18). Die einzelnen meist gebogenen Fasern sind wenige mm dick und erstrecken sich über mehrere dm.

Die Salze des Mittleren Muschelkalks werden als flache, subaquatische Bildungen unter ständiger Laugenbedeckung („saltern evaporites“ nach WARREN 1989) gedeutet. Dabei werden das vertikal elongierte Salz sowie das körnige feinkristalline Salz als primäre Bildungen angesehen. Im Gegensatz dazu stehen die grobkristallinen Varietäten der Salzklassen 2, 4, 5, die als sekundäre Bildungen infolge Rekristallisation angesprochen werden. Die groben Kristalle der Salze sind durch Umkristallisation entstanden, das Sediment wurde stark umgestaltet. Die Verunreinigungen wurden z. T. in die Zwickel zwischen den Kristallen gedrängt. HOVORKA (1987) bezeichnet dieses Salz als „chaotic mudstone halite“.

An Verunreinigungen findet man im Steinsalz vor allem Anhydrit sowie untergeordnet Dolomitmergel. Daneben konnte Quarz und Illit röntgenographisch nachgewiesen werden. Die Verunreinigungen sind meist lagig angereichert oder aber auch in Form von Bröckchen und Fetzen feinverteilt in der Grundmasse. Teilweise sind die einzelnen Verunreinigungen als horizontale Säume im mm-Bereich dem Salz zwischengeschaltet. In der Regel werden Verunreinigungen und Zwischenlagen im Salz auf verdünnende, also die Konzentration der Wässer herabsetzende Einflüsse im Ablagerungsraum zurückgeführt, wobei eine Verdünnung infolge mariner Zuflüsse mit oder ohne Zufuhr detritischen Materials erfolgen kann. Einzig Detritus äolischen Ursprungs ist nicht mit Verdünnung assoziiert. Eine Verdünnung bewirkt in den obersten Salzlagern eine Lösung und so eine Anreicherung der aus dem gelösten Salz stammenden Verunreinigungen in Form von Lösungssäumen. Bei starken marinen Zuflüssen kann es vor einer erneuten Abscheidung von Steinsalz zu einer Bildung von eventuell sehr wenig Dolomit sowie von Anhydrit kommen, so dass Anhydrit dann den wesentlichen Teil der Verunreinigungen bildet, mergeliger Dolomit jedoch auch enthalten ist. In den meist laminierten Zwischenlagen sind ebenfalls Beimengungen detritischen Materials enthalten, die als Beleg für kontinentale Zuflüsse angesehen werden. Dafür spricht auch, dass der dolomitische Anteil der Laminae teilweise Tonsubstanzen enthält. Detritus äolischen Ursprungs kann in ariden Gebieten einen bedeutenden, nicht abschätzbaren Einfluss haben. Nach SUGDEN (1963) werden etwa 30 % der Sedimente im Persischen Golf als äolisch angesehen. PILKEY & NOBLE (1966) sehen im äolischen Material neben biogenem Karbonat die wichtigste Sedimentationsquelle des Persischen Golfes.

In einzelnen anhydritisch verunreinigten Steinsalzproben (RI 51 - 57) konnten geringe Gehalte an Polyhalit ($K_2MgCa_2(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$) röntgenographisch nachgewiesen werden. Polyhalit wird als frühdiagenetische Bildung gedeutet, eine Entstehung durch statische Eindunstung von Meerwasser kann vernachlässigt werden. Fließt in eine bereits an Polyhalit gesättigte oder an $MgSO_4$ oder K_2SO_4 übersättigte Lösung ein mit $CaSO_4$ angereichertes Meerwasser nach, kann sich Polyhalit bilden (BRAITSCH 1971). In der Ojo de Liebre Lagoon (Mexiko) bildete sich Polyhalit durch Verdrängung von Gips innerhalb eines Jahres (PIERRE 1983). Chemische Untersuchungen konnten zeigen, dass diese Mineral-

umbildung auf ein Vermischen von Mg^{2+} - K^+ -reichen, marinen Zuflüssen mit SO_4^{2-} -reichen Grundwasser zurückzuführen ist.

Für die Salinargesteine des Mittleren Muschelkalks wird angenommen, dass sich Polyhalit auf Kosten von Anhydrit zu einem sehr frühen Zeitpunkt bildete. Er tritt in den anhydritisch verunreinigten Haliten in geringen Gehalten unregelmäßig verteilt auf. Mächtigere Polyhalitlagen, wie sie u. a. von GELUK (1995) und PERYT et al. (1998) aus dem Zechstein der Niederlande und Polens beschrieben wurden, konnten weder makroskopisch noch in den geophysikalischen Logs nachgewiesen werden.

5.6 Palynologische Untersuchungen

Von der Bohrung Remlingen 7 wurden aus dem Schichtabschnitt oberster Unterer, Mittlerer und unterster Oberer Muschelkalk insgesamt 46 Proben palynologisch ausgewertet (HEUNISCH 1997, 1998). Neben der palynostratigraphischen Einstufung der Schichtenfolge erfolgte eine mengenmäßige Auswertung der Palynomorphengruppen, um aufgrund des Verteilungsmusters Aussagen zur Palynofazies machen zu können (Abb. 16). Es wurden Sporen, Pollen, marines Phytoplankton, mehrzellige Grünalgen und unbestimmbare Palynomorphen ausgehalten. Der Erhaltungszustand der Palynomorphen ist sehr mäßig, so dass in fast allen Proben ein hoher Anteil unbestimmbarer Exemplare vorhanden ist (Tab. 10, 11). In den meisten Proben dominieren innerhalb der bestimmbaren Taxa bisaccoide Pollen.

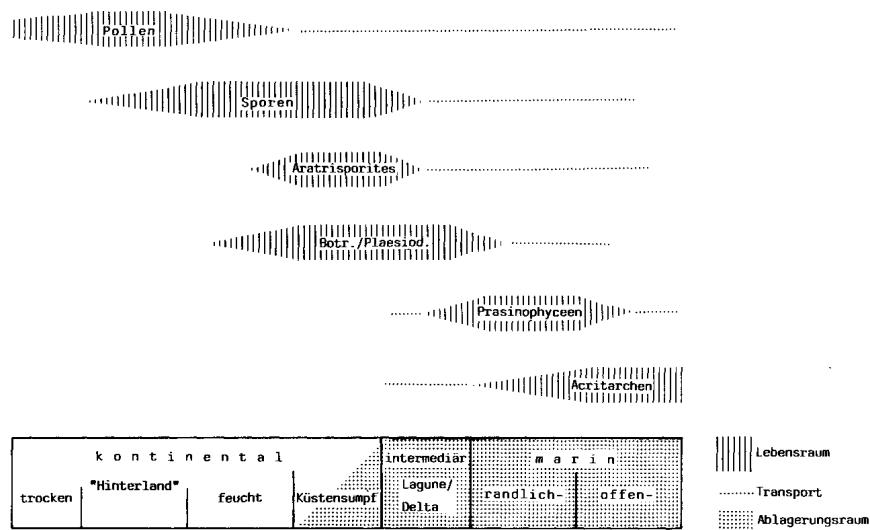


Abb. 16: Primäres Vorkommen und Ablagerungsräume von Palynomorphen des Muschelkalks (HEUNISCH 1990)

Bei der palynostratigraphischen Gliederung der Trias werden zur Festlegung von chronostratigraphischen Grenzen neben dem Ein- und Aussetzen bestimmter Taxa auch Häufigkeitsmaxima, demzufolge fazielle bzw. palökologische Unterschiede, zur Abgrenzung einzelner Zonen herangezogen. Für die Germanische Trias erstellte HEUNISCH (1999) eine Gliederung in 20 Abschnitte. Dabei wird der Mittlere Muschelkalk den Abschnitten GTr8 und GTr9 zugeordnet (Tab. 6). Der Abschnitt GTr8, der vom höheren Teil des Röts über den Untereren Muschelkalk bis in die tieferen Schichten des Mittleren Muschelkalks reicht, zeichnet sich durch weitgehend gleiche Palynomorphen-Taxa aus. Häufig sind *Triadispora* spp. und *Microcachryidites* spp.; *Stellapollenites thiergartii* und *Tsugaepollenites oriens* sowie *Lapposporites* spp. sind permanent vorhanden. Die einzelnen stratigraphischen Einheiten zei-

gen jedoch Unterschiede im Anteil und der Zusammensetzung des marinen Phytoplanktons. Der Abschnitt GTr9 reicht vom mittleren Teil des Mittleren Muschelkalks bis in den höheren Oberen Muschelkalk. Innerhalb dieses Abschnitts setzen die Pollentaxa *Podosporites amicus* und *Protodiploxyphorus* spp. ein. *Institisporites* sp. ist auf diesen Abschnitt beschränkt. Die obere Grenze des Abschnitts GTr9 wird durch das letztmalige Auftreten von *Stellapollenites thiergartii* und *Tsugaepollenites oriens* bestimmt.

Tab. 6: Palynostratigraphische Gliederungen des Muschelkalks und Verbreitung stratigraphisch wichtiger Paly-nomorphen-Taxa im Muschelkalk des Mitteleuropäischen Beckens (nach HEUNISCH i. Vorb.)

Die Grenze Unterer/Mittlerer Muschelkalk liegt in der Bohrung Remlingen am Top der Oberen Schaumkalkbank bei 538,77 m. Palynostratigraphisch lässt sich diese Grenze nicht fassen, jedoch hebt sie sich palynofaziell deutlich hervor. Deutet das Auftreten von Acritarchen (Morphogruppe L) und Prasinophyceen (Morphogruppe M), die der Großgruppe des marinen Phytoplankton zugerechnet und als (par-)autochthone Mikrofossilien angesehen werden, im obersten Abschnitt der Oberen Schaumkalkbank (Probe RL21) noch auf ein marines Ablagerungsmilieu hin, so lässt das Verschwinden der Acritarchen sowie eine deutliche Abnahme der Prasinophyceen an der Basis des Mittleren Muschelkalks auf eine Veränderung der faziellen Gegebenheiten hin zu salinaren Bedingungen schließen (Tab. 10). Prasinophyceen gelten als charakteristisch für randlich marine und lagunäre Ablagerungsbereiche mit schwankenden Salzgehalten. TAPPAN (1980, 1982) deutet Prasinophyceen als „disaster species“, die auch dann noch auftreten, wenn für andere Phytoplanktonen lebensfeindliche Bedingungen herrschen. In der Bohrung Remlingen 5 konnte dieser fazielle Umschwung von REITZ (1985) ebenfalls aufgezeigt werden. Während REITZ die Grenze Unterer/Mittlerer Muschelkalk zwischen Kernmeter

794,8 und 789,7 legt und somit eine deutliche Abnahme der Acritarchen erst in den basalen Bereich des Mittleren Muschelkalks erfolgt, zeigte die Loggliederung der Bohrung Remlingen 5, dass die Grenze Unterer/Mittlerer Muschelkalk bei Kernmeter 777,5 liegt, so dass der fazielle Umschwung bereits innerhalb des Bereichs der Schaumkalkbänke erfolgt.

In der Bohrung Remlingen 7 setzen innerhalb des Mittleren Muschelkalks verschiedene stratigraphisch bedeutende Taxa neu ein (Tab. 9, Abb. 17). Auffällig ist dabei das gehäufte Einsetzen neuer Taxa im Bereich des Zyklus 5 (Proben RL66 - RL71), so dass oberhalb der halitführenden Zyklen des Mittleren Muschelkalks eine deutliche Zunahme der Diversität der Palynomorphen festzustellen ist. Logstratigraphische Vergleiche haben gezeigt, dass der Zyklus 5 mit dem Dolomit II sensu SCHULZE (1964) sowie dem Mittleren Dolomit sensu SEIDEL (1965) korreliert (s. a. Kap. 6.7). Nach KOZUR (1974) öffnete sich zur Zeit des mittleren Dolomits, wie der Nachweis von Foraminiferen und anderen marinen Fossilien in Lothringen zeigt, im Südwesten des Mitteleuropäischen Beckens eine weitere Verbindung zur marinen Tethys, die bisher allgemein als Burgundische Pforte bezeichnet worden ist. Nach SZULC (2000: S. 40) ist die genaue Lage dieses Verbindungsweges jedoch nicht gesichert. Ein möglicher Ingressionsweg könnte nach SZULC auch die bereits bei EINSELE & SCHÖNENBERG (1964) erwähnte Alpen-Rhein-Depression darstellen. Daher schlägt er vor, bis zu Klärung für den Begriff „Burgundische Pforte“ den neutraleren Begriff „Westliche Pforte“ („Western Gate“) zu verwenden.

Die Grenze zwischen den palynologisch definierten Abschnitten GTr8 und GTr9 wird im Mittleren Teil des Mittleren Muschelkalks gezogen (HEUNISCH 1999). In der Bohrung Remlingen 7 konnten die zur Grenzziehung wichtigen Taxa *Podosporites* sp., *Protodiploxylinus* spp., *Institisporites* sp. und *Staurosaccites quadrifidus* ebenfalls nachgewiesen werden. Während *Podosporites* sp. bereits im obersten Meter des Zyklus 4 (Probe RL61, stark verunreinigtes Steinsalz) auftritt, setzen *Staurosaccites quadrifidus* (Probe RL68), *Protodiploxylinus potoniei* und *Institisporites* sp. im Zyklus 5 (Probe RL70) bzw. *Protodiploxylinus gracilis* erst im Zyklus 8 (Probe RL113) ein. Die Grenze GTr8/GTr9 wird somit an die Grenze Zyklus 4/Zyklus 5 gelegt. Dieses aufeinanderfolgende Einsetzen der oben genannten Taxa korreliert recht gut mit den palynologischen Untersuchungen der Bohrung Obernsees (VISSCHER et al. 1993), obwohl *Institisporites* sp. im Vergleich zur Bohrung Remlingen 7 etwas später einsetzt.

Eine besondere Bedeutung bei der Grenzziehung Anis-Ladin wird den monosaccoiden Pollen *Kuglerina meieri* beigemessen. VISSCHER & BRUGMAN (1981) gehen davon aus, das *Kuglerina meieri* „erstmals im höchsten Anisien an der Wende zum Ladinien“ erscheint. In der Bohrung Remlingen 5 konnte REITZ (1985) *Kuglerina meieri* ebenfalls nachweisen. Er schließt aufgrund dieses Vorkommens darauf, dass die Anis-Ladin-Grenze im Mitteleuropäischen Becken mit der Grenze Mittlerer/Oberer Muschelkalk zusammenfällt. In der Bohrung Remlingen 7 tritt *Kuglerina meieri* erstmals im Zyklus 5 bei Kernmeter 654,68 m auf. Dieses schon relativ frühe Auftreten innerhalb des Mittleren Muschelkalks spricht gegen eine stratigraphische Bedeutung des erstmaligen Auftretens von *Kuglerina meieri* bei der Festlegung der Anis-Ladin-Grenze, so dass der Aussage von REITZ nicht gefolgt werden kann, zumal von ihm aus dem Mittleren Muschelkalk nur vier Proben bearbeitet wurden. Die Anis/Ladin-Grenze wird in der Regel nach KOZUR (1974) an die Basis der *compressus*-Zone gelegt. VISSCHER et al. (1993) legen die Anis/Ladin-Grenze, die sie u. a. anhand des letztmaligen Auftretens von *Stellapollenites thiergartii* und *Dyupetalum vicentinense* definieren, in den höheren Oberen Muschelkalk.

Palynofaziell zeichnen sich die Proben des Mittleren Muschelkalks aus durch:

- das fast völlige Fehlen von Acritarchen;
- das fast alleinige Vorkommen von Prasinophyceen innerhalb der Gruppe der Phytoplanktonen, z. T. aber in geringer Stückzahl,
- hohe Anteile an *Triadispora* spp. (Morphogruppe J),

- eine deutliche Präsenz von *Microcachryidites* spp. (Morphogruppe H) und
- ein meist nur akzessorisches Vorhandensein von Sporen (Morphogruppe A - D) mit Ausnahme von *Porcellispora longdonensis* (Gruppe A) und *Aratrisporites* spp. (Gruppe D) aus.

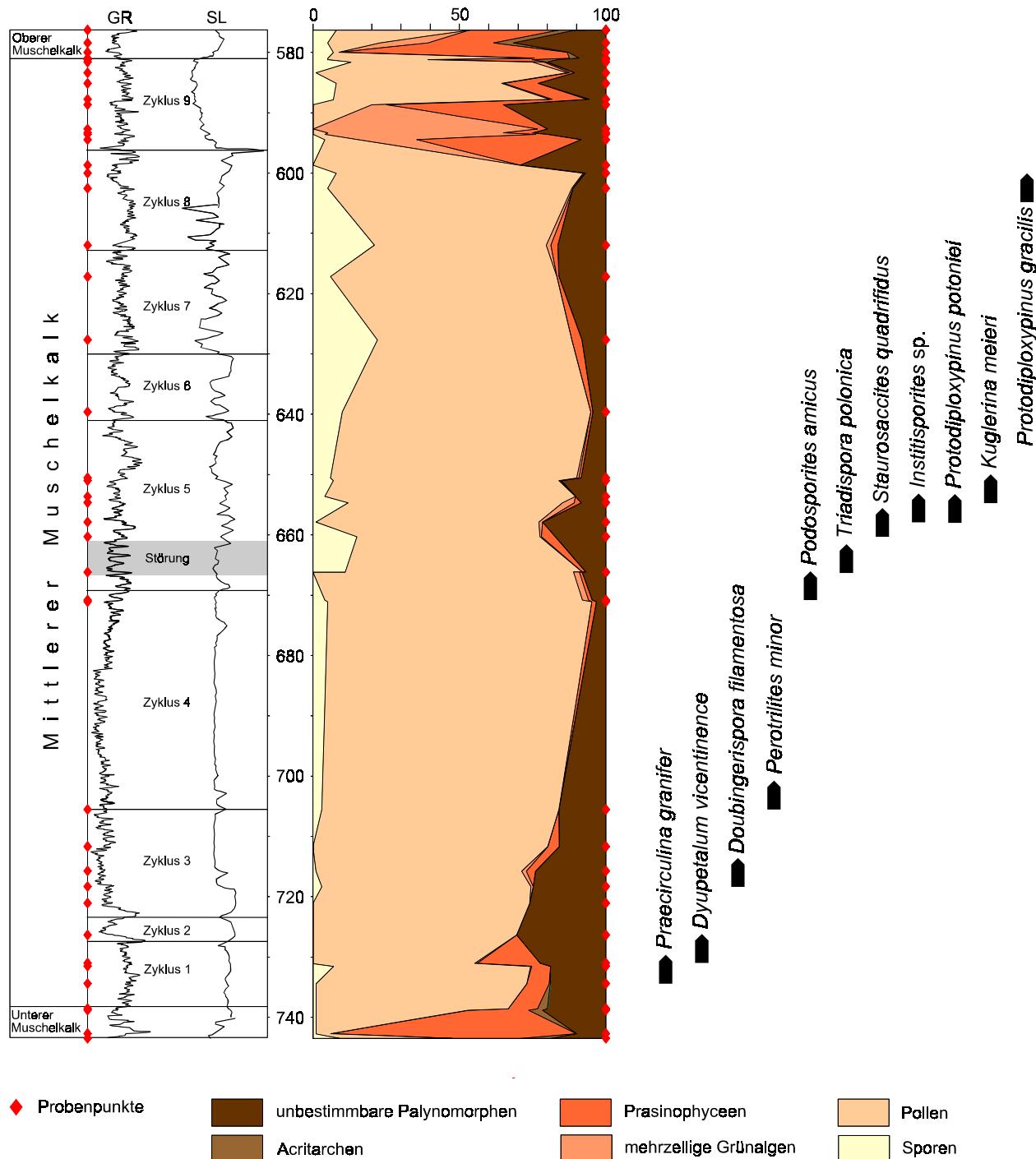


Abb. 17: Palynofazies und Einsetzen stratigraphisch bedeutender Palynomorphen-Taxa im Mittleren Muschelkalk der Bohrung Remlingen 7

In mehreren Proben aus dem Bereich der Zyklen 5 und 7 ist ein deutlicher Anstieg der Spore *Porcellispora longdonensis* zu beobachten. Diese wird von auf dem Wasser lebenden Lebermoosen abgeleitet und als charakteristisch für hypersalinare Ablagerungsräume angesehen (HEUNISCH 1997). *Por-*

cellispora longdonensis wird unter dem Namen *Apiculatasporites plicatus* häufig aus dem Mittleren Muschelkalk erwähnt (z. B. REITZ 1985).

Insgesamt bestätigt die Palynofaziesanalyse für den Mittleren Muschelkalk das Bild eines hochsalinaren, lebensfeindlichen Ablagerungsraumes, in den die von Landpflanzen stammenden Palynomorphen, vorwiegend Pollen, meist eingeweht wurden.

In der Bohrung Remlingen 7 ist ca. 13 m unterhalb der Grenze Mittlerer/Oberer Muschelkalk im Bereich des Zyklus 9 eine deutliche Veränderung des Spektrums zu beobachten. In diesem Bereich (Proben RL126 - RL136) zeigt sich bei deutlicher Fossilarmut – nur wenige identifizierbare Palynomorphen sind vorhanden – ein gehäuftes Auftreten von randlich-marinem Phytoplankton (Leiosphaeren, Morphogruppe M) und *Botryococcus* sp., die den limnisch-brackischen mehrzelligen Grünalgen (Morphogruppe N) zugeordnet und als „parautochthone-Fossilien“ gedeutet werden (HEUNISCH 1990). Diese Florenassoziation lässt sich einem hypersalinen/lagunären Wasserchemismus mit einem deutlichen Süß- oder Brackwassereinfluss zuordnen. Das Palynomorphenspektrum deutet auf ein Regressionsmaximum innerhalb dieses Profilabschnitts des Mittleren Muschelkalks hin. Ablagerungen ausgedehnter Brackwasserareale beschreibt bereits KOZUR (1971, 1974) aus dem oberen Teil des Mittleren Muschelkalks (oberer mm3). Die Aussübung ging bis zum Brachyhalinikum und Pliohalinikum. Die Schichten des obersten Mittleren Muschelkalks werden durch das Einsetzen von *Protodiploxylinus gracilis* (Morphogruppe H) charakterisiert. Die zu den Koniferen gehörenden Mutterpflanzen von *Protodiploxylinus* werden als Vertreter einer xerophytischen „Küstenpionier“-Vegetation angesehen, die sich landeinwärts dem von *Lycophyten* (Morphogruppe D: *Aratrisporites* spp.) gebildeten „Mangrovengürteln“ vorlagern, während *Striatobabieites* und *Protohaploxylinus* die Hinterlandvegetation repräsentieren (VISSCHER et al. 1993, HEUNISCH 1996). Daneben kommen ab einer Tiefe von ca. 587,83 m (Probe RL 138) wieder die ersten Acritarchen vor.

Aus der Bohrung Obernsees (Süddeutschland) wird aus dem oberen Abschnitt des Mittleren Muschelkalks ebenfalls das Einsetzen von *Protodiploxylinus gracilis* und *Podosporites amicus* beschrieben (VISSCHER et al. 1993), so dass das Einsetzen dieser Elemente als wichtiger palynostratigraphischer Korrelationsmarker im Mitteleuropäischen Beckens angesehen werden kann.

Unterhalb der lithofaziell und bohrlochgeophysikalisch definierten Grenze Mittlerer/Oberer Muschelkalk ist ab dem Kernmeter 581,6 eine deutliche Änderung des Palynomorphenspektrums zu verzeichnen. Charakteristisch ist ein deutlicher Rückgang von *Triadispora* spp. sowie das fast völlige Verschwinden von *Microcachryidites* spp. und *Tsugaepollenites oriens*. Neben alethen bisaccoiden Pollen kommen vor allem marine Phytoplankonten vor. In zwei Proben konnten Pilzsporen nachgewiesen werden. Während für den Mittleren Muschelkalk das fast völlige Fehlen von Acritarchen kennzeichnend ist, belegen die nun wieder gehäufte auftretenden Acritarchen (Probe RL 160) den faziellen Umschwung zu normal marinen Ablagerungsbedingungen an der Grenze zum Oberen Muschelkalk.

5.7 Geochemische Untersuchungen

Geochemische Parameter können in Kombination mit lithologisch-sedimentologischen und mikrofaziellen Untersuchungen stratigraphisch-fazielle Gliederungen präzisieren. Dabei spiegelt die Chemozäsuren der Gesteine die physikochemischen Ablagerungsbedingungen wider. Die geochemischen Untersuchungen wurden durchgeführt, um

- die Sequenzen des Mittleren Muschelkalks geochemisch zu charakterisieren,
- brauchbare chemische Signaturen und unterschiedliche Elementverteilungsmuster aufzuzeigen,
- die Beziehungen zwischen der chemischen Elementverteilung, der Lithologie und den Faziestypen zu untersuchen,
- beurteilen zu können, inwieweit die Chemostratigraphie auf Grundlage einer RFA-Analyse als eine Möglichkeit der Gliederung und Korrelation der karbonatisch-evaporitischen Abfolgen des Mittleren Muschelkalks in Frage kommt.

Die lithologischen und geochemischen Analysen ermöglichen eine Typisierung der Gesteine des Mittleren Muschelkalks und eine Zuordnung der Proben entsprechend ihrer chemischen Zusammensetzung, ihrem Gehalt an Karbonat, Anhydrit und unlöslichem Rückstand (insoluble residue, IR). In Anlehnung an FÜCHTBAUER (1959) werden die Sedimente des Muschelkalks in Karbonate, Tonsteine, Anhydrite und Übergangsgesteine unterteilt, die wiederum aufgrund ihrer Mineralogie differenziert werden (Tab. 7, Abb. 18). Die Gruppe der Karbonate konnte so in Kalke und Dolomite (1.3) unterteilt werden, wobei bei den Kalken nicht oder nur geringfügig dolomitisierte Gesteine (Dolomitgehalt < 10 %, 1.1) sowie stark dolomitisierte Gesteine (1.2) unterschieden werden. Als eine weitere Gruppe werden Halite ausgehalten.

Karbonate (1)		Gehalt an IR <25% Gehalt an Anhydrit <25%
Tonsteine (2)		Gehalt an Karbonat <25% Gehalt an Anhydrit <25%
Anhydrite (3)		Gehalt an IR <25% Gehalt an Karbonat <25%
Übergangsgesteine (4)	Dolomit-Kalkmergel (4.1)	Karbonatische Gesteine mit Gehalt an IR 25-50%, Gehalt an Anhydrit <25%
	Tonmergel (4.2)	Tonige Gesteine mit Gehalt an Karbonat 25-50%, Gehalt an Anhydrit <25%
	Dolomit-Anhydritgesteine (4.3)	Gehalt an Anhydrit 25-75%, Gehalt an Karbonat 25-75%, Gehalt an IR <25%
	Ton-Anhydritgesteine (4.4)	Gehalt an Anhydrit 25-75%, Gehalt an IR 25-75%, Gehalt an Karbonat <25%
	Anhydrit-Mergel (4.5)	Gehalt an Anhydrit 25-75%, Gehalt an IR 25-75%, Gehalt an Karbonat 25-75 %
Halite (5)		

Tab. 7: Charakterisierung der Gesteine des Mittleren Muschelkalks in der Bohrung Remlingen 7

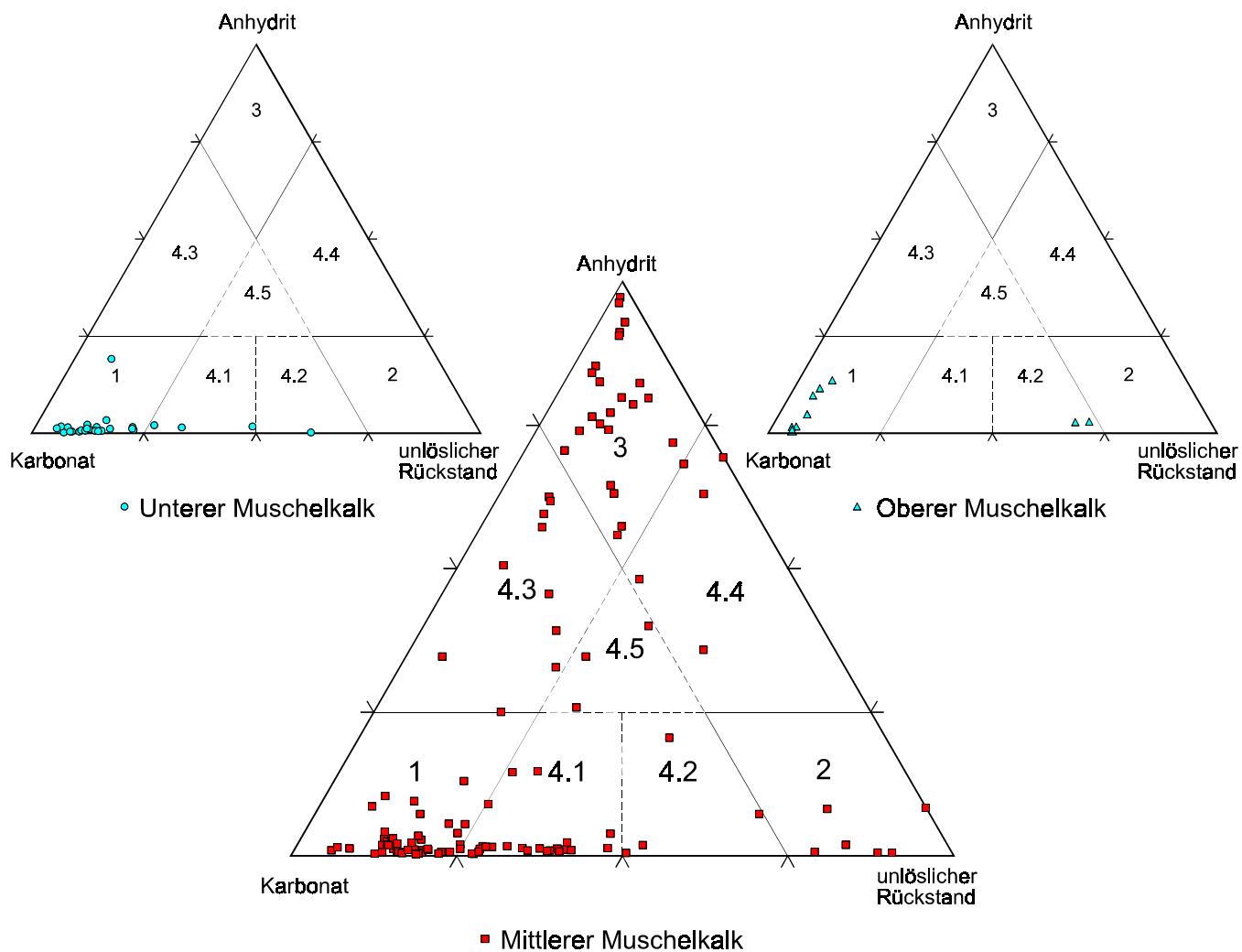


Abb. 6: Zusammensetzung der Sedimente (ohne Halit) im untersuchten Profil

5.7.1 Elementverteilungen

In die geochemischen Auswertungen wurden nur die Elemente einbezogen, deren Elementgehalte in mehr als 70 % der analysierten Proben oberhalb der Nachweisgrenze liegen. Dies hatte zur Folge, dass die Elemente Bi, Ce, Co, Cs, F, Ga, Hf, La, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sn, Ta, Th, U und W nicht oder nur in einzelnen Fällen betrachtet wurden.

Die unterschiedlichen Gehalte der mit der Röntgenfluoreszenzanalyse bestimmten Elemente erlauben eine Unterteilung in 3 Gruppen. Dabei zählen die Elemente

- Ca, Mg, Si, Al, SO₃ mit Gehalten im Prozentbereich zu den Hauptelementen,
- Sr, Fe, Mn, Na, K, P, Ti, Cl, F mit Gehalten von 100 ppm bis zu 1 % zu den Nebenelementen sowie
- **As, Ba, Bi, Ce, Co, Cs, Cr, Cu, Ga, Hf, La, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sb, Sc, Sn, Ta, Th, U, V, W, Y, Zn, Zr** mit Gehalten unter 100 ppm zu den Spurenelementen, wobei ein Großteil von ihnen (Bi, Ce, Co, Cs, Ga, Hf, La, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sn, Ta, Th, U, W) Elementgehalte besitzt, die in mehr als 30 % der Fälle unterhalb der Nachweisgrenze liegen.

Zur Verdeutlichung des geochemischen Verteilungsmusters wurden zum einen die röntgenfluoreszenzanalytisch bestimmten Elementgehalte der einzelnen Proben sowie die aus diesen Werten ermittelte Mineralzusammensetzung in Tabelle 12 zusammengestellt. Zum anderen wurden der Mittel-, Maximal- und Minimalwert, der Medianwert und die Standardabweichung der einzelnen Elemente über das Gesamtprofil (Abb. 19) und für die aus der Mineralzusammensetzung abgeleiteten einzelnen Gesteinsgruppen (s. Tab. 7) berechnet (Tab. 13). Die Gruppe der Halitgesteine wurden in diese Untersuchungen nicht mit einbezogen, da an diesen Proben lediglich Untersuchungen zum Br-, Rb- und Sr-Gehalt erfolgten.

In den Anlagen 5 und 6 sind die geochemischen Untersuchungsergebnisse ausgewählter Elemente in Abhängigkeit von der stratigraphischen Position innerhalb des Mittleren Muschelkalks dargestellt. Histogramme veranschaulichen die Elementverteilungen (Abb. 21). Besonders deutlich ist eine Bimodalität der Verteilung des Elementes Mg zu erkennen, die auf eine Bindung von Magnesium an unterschiedliche Mineralphasen zurückgeführt wird.

Calcium ist in den Gesteinen des Mittleren Muschelkalks Hauptbestandteil, sowohl der Karbonat- als auch der Sulfatphase. Es ist im wesentlichen an die Minerale Calcit, Dolomit und Anhydrit gebunden. Während der Ca-Mittelwert für Kalke bei 28,87 % liegt, weisen Anhydrit (25,39 %) und Dolomit (19,82 %) deutlich geringere Werte auf.

Magnesium ist neben Calcium Hauptbestandteil der Karbonatphase und in der Regel auf Dolomit zurückzuführen. Der Mg-Mittelwert für die untersuchten Dolomite liegt bei 10,1 %. Während LANGBEIN (1967a) im Mittleren Muschelkalk Thüringens Magnesit, gebunden an zwei höher salinare Anhydrithorizonte, nachweisen konnte, war dies in der Bohrung Remlingen 7 nicht möglich. Magnesit ist das am leichtesten lösliche Karbonat und wird bei Erreichen der Chloridphase primär gebildet (BRAITSCH 1962). Ein bei der Berechnung der Mineralzusammensetzung beobachteter Überschuss an MgO wird auf eine silikatische Bindung zurückgeführt. Röntgenographische und Mikrosonden-Untersuchungen weisen auf eine Fixierung von MgO an die Tonminerale der Chloritgruppe hin. LANGER (1989) beschreibt aus dem Mittleren Muschelkalk des Osnabrücker Berglandes (Bohrung Rulle 1) ebenfalls Mg-reichen Chlorit. In der Häufigkeitsverteilung (Abb. 21) kommt die Bindung des Mg sowohl an die Karbonat- als an die Tonmineral-Phase durch die Ausbildung von zwei Maxima (bimodale Verteilung) zum Ausdruck.

Einen bedeutenden Anteil an den Gesteinen des Mittleren Muschelkalks nehmen die Sulfatgesteine ein, die sowohl in den karbonatischen Schichtpaketen als auch in den sulfatischen Abfolgen, dort steinsbildend, vorkommen. Das Element **Schwefel** wurde mittels RFA als Rest-SO₃ bestimmt. Die Hauptmenge von SO₃ ist dabei an den Anhydrit gebunden. Der SO₃-Gehalt ist großen Schwankungen unterworfen und liegt zwischen 0,17 % und 57,21 %. Die Gruppe der Anhydrite weist einen SO₃-Mittelwert von 45,31 % auf. Röntgenographisch konnten Spuren weiterer evaporitischer Sulfatminerale wie Gips, Coelestin (SrSO₄) und Polyhalit (K₂MgCa₂(SO₄)₄·2H₂O) nachgewiesen werden. In einem sehr geringen Umfang ist eine Bindung des Schwefels an die Sulfidphase anzunehmen. Mikroskopisch konnte in einzelnen Proben Pyrit nachgewiesen werden, der als diagenetische Bildung in Form von euhedralen Kristallen und Framboiden ausgebildet ist und verschiedene Spurenelemente einbauen kann.

Als Hauptelemente wurden weiterhin **Silizium** und **Aluminium** ausgehalten, die neben **Eisen** und **Kalium** die terrigene Phase bestimmen. Die Proben des untersuchten Profilabschnitts bestehen in ihrer Gesamtheit aus relativ unreinen Karbonat- und Sulfatgesteinen mit einem SiO₂-Mittelwert von 11,94 %. Quarz-Siltitlagen rufen einen für Dolomite relativ hohen Durchschnittsgehalt von 10 % **SiO₂** hervor. Erhöhungen des SiO₂-Gehaltes im Bereich des Zyklus 9 (Diemel-Formation) werden auf einzelne mikroskopisch beobachtete und diagenetisch entstandene Hornsteinbildungen im Sediment zurückgeführt. Daneben ist Si vor allem an Tonminerale und Feldspäte gebunden. Betrachtet man die

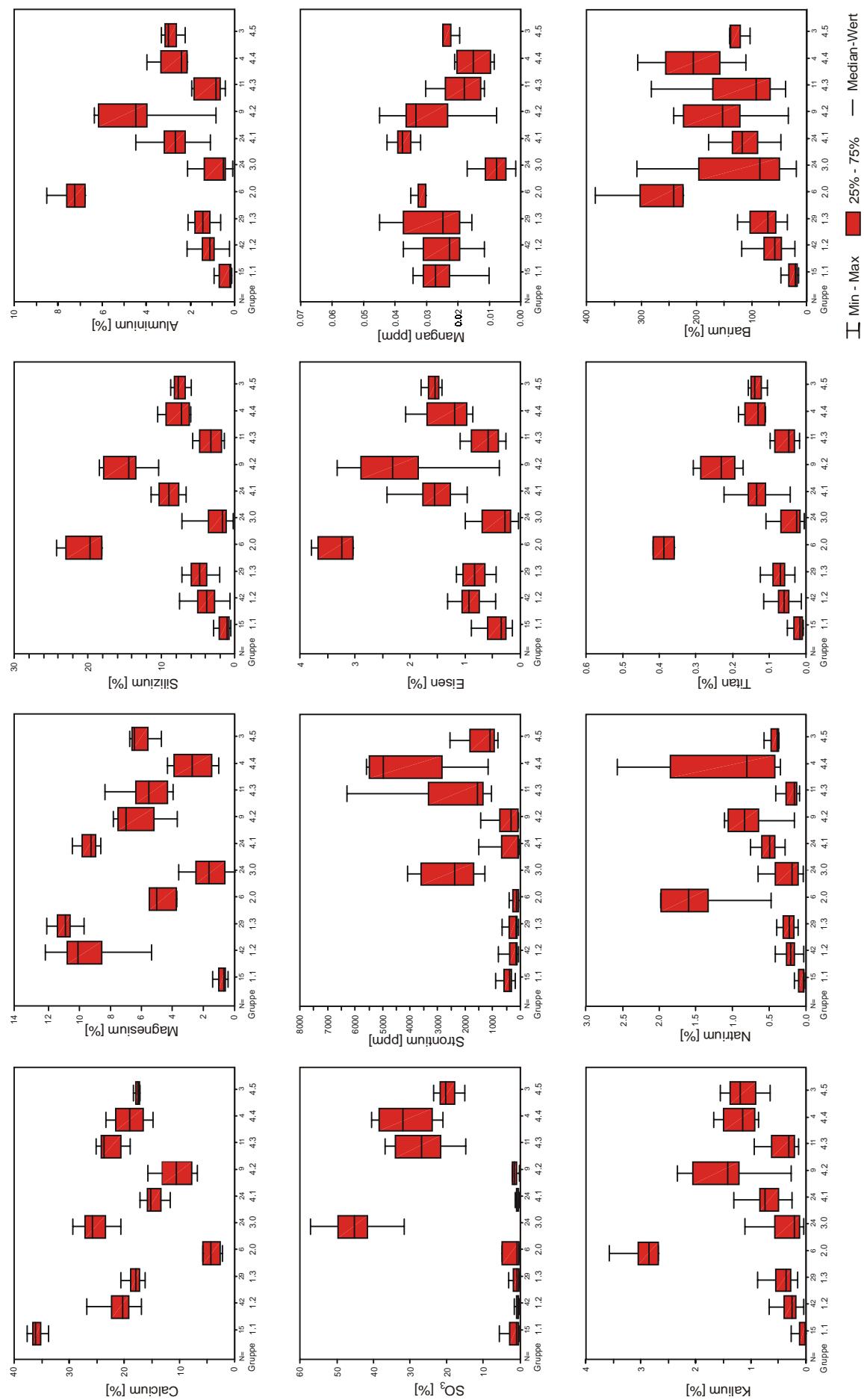


Abb. 19: Boxplots ausgewählter Elemente - Sedimentgruppen im Vergleich

Korrelationskoeffizienten, zeigt sich, dass Si hohe bis sehr hohe positive Korrelationen u. a. mit den Elementen Al, Fe, K, Na und Ti sowie dem unlöslichen Rückstand aufweist (Abb. 20).

Die Gesamtgesteins-**Aluminium**-Gehalte korrelieren signifikant mit dem unlöslichen Rückstand ($r = 0,9572$) (Abb. 20). Das dreiwertige Aluminium-Ion ist somit an den unlöslichen Rückstand, vor allem an Tonminerale sowie untergeordnet Feldspäte gebunden. Ein Einbau in das Calcit-/Dolomitgitter ist nicht möglich. Die durchschnittlichen Al-Gehalte für das Gesamtgestein liegen bei 1,78 %.

Eisen zeigt eine hohe Korrelation mit dem unlöslichen Rückstand und ist dabei vor allem an die Tonmineralfraktion gebunden. Neben Eisenoxid und Pyrit treten eisenreiche Illite und Chlorite als Eisenträger auf. Eisen zeigt eine signifikante Korrelation mit dem unlöslichen Rückstand ($r = 0,9082$) (Abb. 20). Hinweise für einen Einbau von Eisen in das Calcit-/Dolomitgitter finden sich nur in einem geringen Umfang. Einzelne spätdiagenetische Calcitzemente sowie Dolomithomboeder fallen aufgrund ihrer Verfärbung nach einem Anfärben mit Kalium-hexacyanoferrat (III) auf, was auf einen Eiseneinbau ins Karbonatgitter hindeutet. In die nahezu stöchiometrisch zusammengesetzten Dolomite des Mittleren Muschelkalks ist ein Einbau von Eisen jedoch nur in einem sehr geringen Umfang möglich. Die Fe-Mittelwerte liegen für die Gruppe der Calcite bei 0,52 % und für die Dolomite bei 0,86 %.

Kalium besitzt mit einem Gesamtgesteinsmittelwert von 0,58 % einen gegenüber dem Oberen Muschelkalk (RÖHL 1988) deutlich geringeren Wert. Im Allgemeinen zeigt Kalium deutliche Bindungen an Tonminerale und Feldspäte, so dass geringere Gehalte an Tonmineralen und Feldspäten im Mittleren Muschelkalk verantwortlich sind für die geringeren K-Gehalte. Bestätigt wird diese Aussage durch die deutlich höheren K-Mittelwerte für Tonmergel- bis Mergelsteine von 2,1 % gegenüber denen für Karbonate von 0,28 %. Kalium zeigt eine hohe Korrelation ($r = 0,8990$) mit dem unlöslichen Rückstand (Abb. 20).

Das Spurenelement **Strontium** wird in marinen Karbonaten und Evaporiten diadoch in die Ca-Mineralien Dolomit, Calcit, Aragonit und Gips eingebaut, wobei Gips mengenmäßig die mit Abstand größte Bedeutung zukommt. In salinaren Abfolgen ist Strontium im Besonderen an die Minerale Anhydrit und Polyhalit gebunden. Experimentell konnte USDOWSKI (1973) in Laborversuchen nachweisen, dass bei fortschreitender Evaporation immer mehr Strontium in das Ca-Sulfatgitter eingebaut wird. Neben dem Sr-Einbau in Ca-Sulfate tritt Coelestin als eigenständiges Mineral in salinar beeinflussten Formationen auf. Die Sr-Gehalte des untersuchten Profilabschnittes zeigen eine große Schwankungsreihe und reichen von 53 ppm bis zu 3,31 %. Der Mittelwert liegt bei 1647 ppm. Das Sulfatmineral Coelestin konnte in einer Reihe von Proben röntgenographisch nachgewiesen werden. Eine Korrelation zwischen unlöslichem Rückstand und den Sr-Gehalten ist nicht vorhanden, so dass eine adsorptive Bindung des Strontiums an die Tonminerale (BAUSCH 1968) nicht bestätigt werden kann.

Der **Mangan**-Mittelwert des Gesamtgesteins beträgt für die untersuchte Abfolge 244 ppm. Die Gehalte schwanken zwischen 31 ppm und 596 ppm, wobei die niedrigsten Werte an die Anhydrite gebunden sind. Innerhalb der Karbonate sind die Calcite und spät-diagenetischen Dolomite gegenüber den salinaren stöchiometrischen Dolomiten meist ärmer an Mangan, was besonders deutlich im Grenzbereich Unterer/Mittlerer Muschelkalk zum Ausdruck kommt. Zusätzlich zur karbonatischen Bindung ist Mangan ebenfalls an die terrigene Phase gebunden.

Die **Natrium**-Gehalte des Gesamtgesteins liegen bei 0,4 % und sind somit deutlich höher als im Oberen Muschelkalk (RÖHL 1988). Nach LAND & HOOPS (1973) kann Natrium proportional zur Salinität in das Karbonatgitter eingebaut werden. VEIZER et al. (1977, 1978) konnten für paläozoische Karbonate charakteristische Verteilungen für normal marine und hypersalinare Faziesbereiche aufzeigen, wobei die Dolomite des hypersalinaren Milieus erhöhte Werte aufweisen. Die ermittelten Na-Mittelwerte von 0,08 % für Calcit und von 0,24 % für Dolomit bestätigen ein solches Verteilungsmuster. Unter hypersalinaren Bedingungen zeigt Na jedoch auch eine höhere Adsorption an Tonminerale. Die

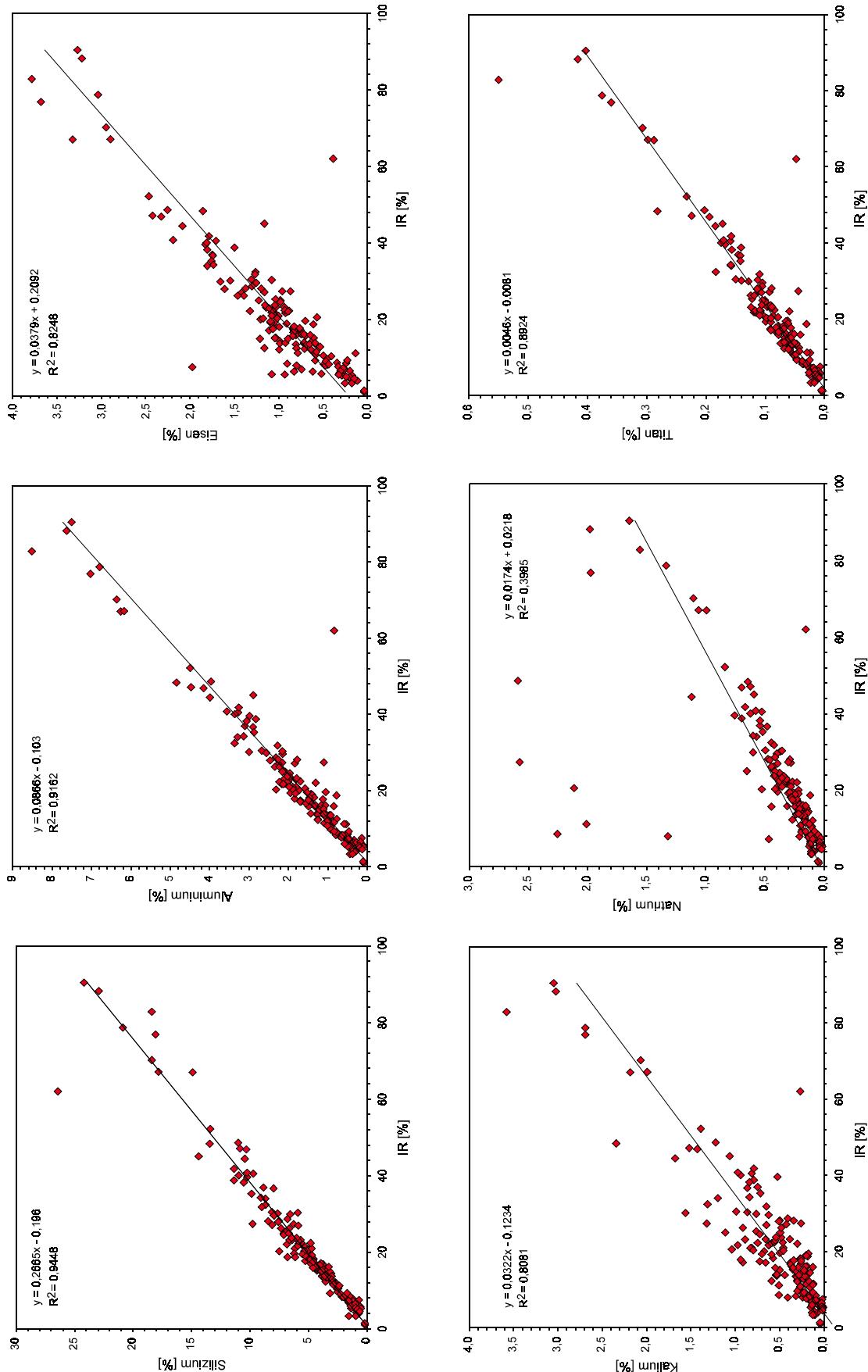


Abb. 20: Korrelationen ausgewählter Elemente mit dem unlöslichen Rückstand [IR]

gegenüber den Karbonaten deutlich höhere Mittelwerte der Tonmergel- und Tongesteine (1,23 %) macht eine Bindung des Natriums an den nichtkarbonatischen Rückstand deutlich. Neben einer Na-Bindung an Tonmineralen tritt eine Bindung vor allem an Feldspatminerale auf. Die Na-Gehalte korrelieren signifikant mit dem unlöslichen Rückstand ($r = 0,6313$, Abb. 20). Zusammenhänge zwischen den Na-Gehalten von Karbonaten und insbesondere von Dolomiten und der Fazies werden von FRITZ & KATZ (1972), VEIZER et al. (1977, 1978), OGURELEC & ROTHE (1979) und JOACHIMSKI (1991) aufgezeigt

Das Element **Titan** ist an die nichtkarbonatischen Komponenten der Gesteine gebunden. Dabei zeigen die Ti-Gehalte eine sehr hohe Korrelation mit dem unlöslichen Rückstand, der Korrelationskoeffizient r beträgt 0,9446 (Abb. 20). Der Ti-Mittelwert für das Gesamtgestein liegt bei 914 ppm. Gegenüber WEDEPOHL (1970) sind die für den Profilabschnitt bestimmten Ti-Gehalte relativ hoch. Dies wird auf die z. T. recht hohen Gehalte an IR in den untersuchten Proben zurückgeführt. Nach CORRENS (1971/1972) können in Tonen durchschnittlich 0,8 % TiO_2 , entsprechend 0,48 % Ti enthalten sein. Titan selbst kann am Aufbau der Tonminerale beteiligt und nach CORRENS z. B. in die Gitter von Kaolinit und Illit eingebaut sein. Chlorite enthalten durchschnittlich 0,19 %.

Der Mittelwert für das Gesamtgestein liegt für das Element **Phosphor** bei 255 ppm. Eine Korrelation mit dem unlöslichen Rückstand, wie zum Beispiel von DÜNKEL (1992) beschrieben, ist nicht nachweisbar. Der Korrelationskoeffizient liegt bei 0,3093 und deutet auf eine geringe Korrelation hin. Phosphoranreicherungen in einzelnen Proben werden durch phosphatisierte Biogenpartikel hervorgerufen.

Die **Barium**-Gehalte liegen im Durchschnitt bei 127 ppm, wobei die höchsten Gehalte in den Tonmergel- und Tonsteinen sowie in den Anhydritgesteinen gemessen wurden. Aufgrund des gegenüber den evaporitischen Mineralen erhöhten Ba-Gehaltes in den Zechsteinsalztonen von Nörten (Südniedersachsen) nahm bereits v. ENGELHARDT (1936) eine Adsorption von Barium an Tonminerale bei der salinaren Sedimentation an. Daneben zeigt das Barium hohe Korrelationen mit den Elementen Sr ($r = 0,8572$), Zr ($r = 0,7786$) und Nb ($r = 0,7570$) sowie mittlere Korrelationen mit Ce ($r = 0,5262$). Nach MÜLLER (1962) wird der größte Teil des im Meerwasser enthaltenen Bariums bei der Evaporation während der Coelestinabscheidung gebunden. In den eindeutig coelestinführenden Proben des Mittleren Muschelkalkes zeigen sich neben deutlich erhöhten Sr-Gehalten auch erhöhte Ba-Gehalte. Es zeigt sich, dass neben einer adsorptiven Bindung des Bariums an die Tonminerale ebenfalls eine Bindung an das Coelestin (SrSO_4) vorliegt.

Die Spurenelemente gehen hauptsächlich in die terrigene Phase ein. Sie sind zudem häufig an oxidische Mineralkomponente gebunden. Auffällige hohe Korrelationen finden sich zwischen dem unlöslichen Rückstand sowie den Elementen Chrom ($r = 0,8907$), Nickel ($r = 0,8253$), Rubidium ($r = 0,8867$) und Vanadium ($r = 0,9271$). Als Redoxindikator findet das Verhältnis Vanadium/Chrom Anwendung. Allgemein zeigen Werte, die größer 1 sind, reduzierende Bedingungen in den obersten Sedimentlagen an.

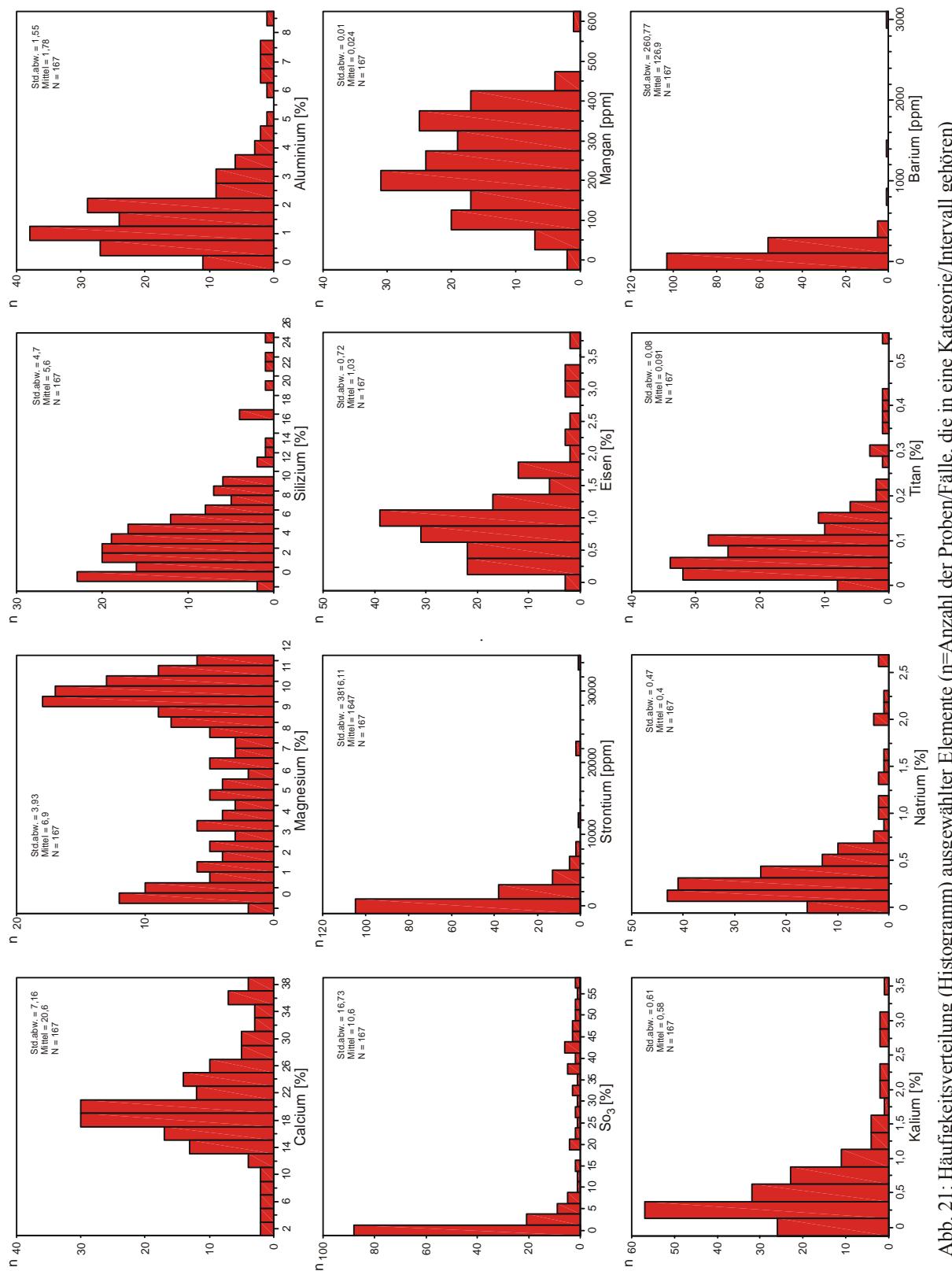


Abb. 21: Häufigkeitsverteilung (Histogramm) ausgewählter Elemente (n=Anzahl der Proben/Fälle, die in eine Kategorie/Intervall gehören)

5.7.2 Geochemie der Karbonate

5.7.2.1 Gesamtkarbonatgehalt und karbonatmineralogische Zusammensetzung

Sulfatische und siliklastische Einschaltungen in den Karbonatgesteinen des Mittleren Muschelkalks bestimmen in einem erheblichen Maße die Schwankungen des Gesamtkarbonatgehalts der untersuchten Karbonatgesteinssproben. Abb. 22 gibt einen Überblick über die Verteilung des Gesamtkarbonatgehalts aller Proben in Form eines Histogramms. Dabei wurde der Karbonatgehalt aus den Ergebnissen der Röntgenfluoreszenzanalyse ermittelt (s. Kap. 3.5). Dabei wurde der Karbonatgehalt aus den Ergebnissen der Röntgenfluoreszenzanalyse ermittelt (s. Kap. 3.5). Deutlich wird eine leichte Bimodalität der Verteilung. Diese geht zum einen auf die Vorherrschaft von mergeligen Dolomiten zum anderen auf die durchweg geringen Beimengungen von Dolomit vor allem in den Anhydriten im Profil zurück.

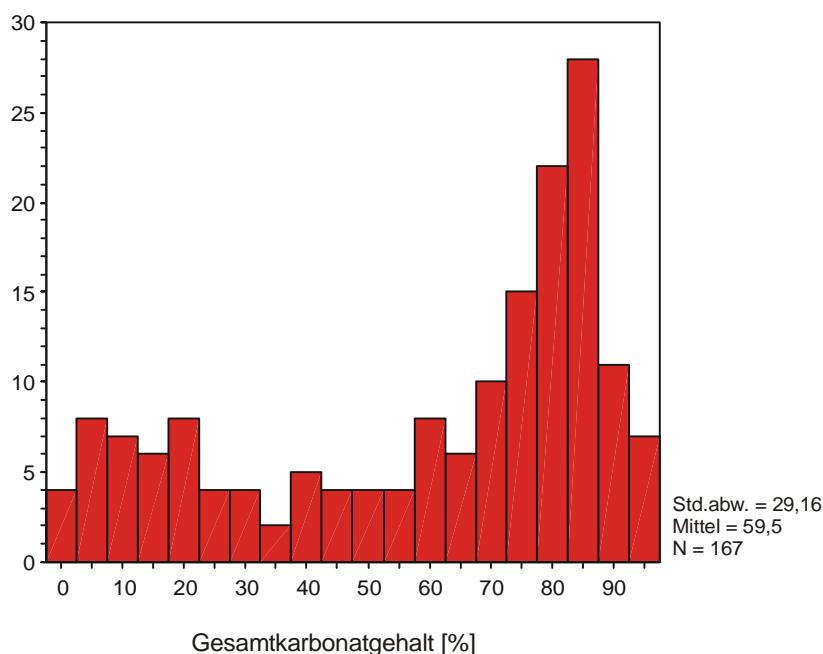


Abb. 22: Häufigkeitsverteilung des Gesamtkarbonatgehalts

Die mineralogische Zusammensetzung der untersuchten Karbonatgesteinssproben variiert ebenfalls. Calcitische und dolomitische Karbonate treten auf, wobei calcitische Karbonate in unterschiedlichem Maße dolomitisiert sein können. Neben Kalken, die nur in einem geringen Maße dolomitisiert sind, der Dolomitgehalt liegt bei unter 10 %, finden sich Kalke, die neben primären Calcit über 10 % Dolomit enthalten. Nicht dolomitisierte Kalke konnten im untersuchten Profilabschnitt nicht nachgewiesen werden. Reine Dolomite, die sich im gesamten Mittleren Muschelkalk finden, bilden die dritte Gruppe innerhalb der Karbonatgesteine. Dedolomitisierung wurde in den Dolomiten nicht beobachtet.

Ausschließlich sekundär entstandener Calcit findet sich in einzelnen Anhydriten, wobei der Calcit auf die Verdrängung von Calciumsulfat zurückgeführt wird.

Magnesit, als das am leichtesten lösliche Karbonat konnte im salinaren Gesteinspaket des Mittleren Muschelkalkes nicht beobachtet werden, so dass das Fehlen als ein Hinweis auf eine relativ niedrige Salinität während des Mittleren Muschelkalks angesehen wird. Nach BRAITSCH (1962) wird Magnesit erst mit dem Erreichen der Chloridphase primär ausgeschieden.

5.7.2.2 Zur Stöchiometrie des Dolomits

Aufgrund des Einbaus von Fremdionen in das Dolomitgitter sind Abweichungen von der stöchiometrischen Zusammensetzung der Dolomite möglich. So erscheint ein Großteil der natürlichen Dolomite nicht stöchiometrisch zusammengesetzt. Abweichungen von der idealen Zusammensetzung von $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3 = 50/50$ sind häufig und der CaCO_3 -Gehalt kann bis zu 58 % betragen. Seltener wird ein MgCO_3 -Überschuss beobachtet.

LUMBSEN & CHIMAHUSKY (1980) und MORROW (1978) unterscheiden 3 Gruppen von Dolomiten:

- einen körnig-kristallinen Dolomit mit einer annähernden Stöchiometrie (CaCO_3 : 50 - 51 %)
- einen feinkristallinen, Ca-reichen Dolomit (CaCO_3 : 54 - 56 %), der nicht mit Evaporiten assoziiert ist und
- einen feinkörnigen, nahezu stöchiometrischen Dolomit (CaCO_3 : 51 - 52 %), der mit Evaporiten assoziiert ist.

Während der erstgenannte Dolomit als spätdiagenetische Bildung angesehen wird, werden die beiden letzteren Dolomit-Typen als frühdiagenetisch interpretiert, so dass eine fazielle Interpretation auf Grundlage der Stöchiometrie möglich ist. Nach FÜCHTBAUER (1988) wird der Ca-Überschuss im Dolomit vom Chemismus der dolomitisierenden Lösungen und so im Allgemeinen von der Salinität des Milieus bestimmt. Mit zunehmender Aridität bzw. Salinität nimmt der Ca-Überschuss im Dolomitgitter infolge einer CaSO_4 -Ausscheidung und einer damit verbundenen Erhöhung des $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ -Verhältnisses im Wasser ab. Im humiden Klima der Florida Keys entsteht so ein Ca_{58-64} -Dolomit und im ariden Klima des Persischen Golfes dagegen ein Ca_{50-55} -Dolomit (LUMBSEN & CHIMAHUSKY 1980). Nach RICHTER (1984) treten im Mittleren Keuper in der Dolcrete-Playasequenz Ca-Dolomite, in der Evaporit-Playasequenz hingegen stöchiometrische Dolomite oder gar Mg-Dolomite auf.

In Abb. 23 sind die Ergebnisse der röntgendiffraktometrischen Untersuchungen zum Ca-Überschuss im Dolomit zusammengefasst. Röntgenographisch konnten neben stöchiometrischen Dolomit sowohl Mg- als auch Ca-Dolomite im untersuchten Profilabschnitt der Bohrung Remlingen 7 nachgewiesen werden. Es wird ersichtlich, dass ein nahezu stöchiometrischer Dolomit sehr häufig ist und bei weitem den größten Anteil an den untersuchten Proben hat. Ein weiteres Häufigkeitsmaximum zeichnet sich für Dolomite mit einer Zusammensetzung zwischen $\text{Ca}_{54,0}$ und $\text{Ca}_{55,0}$ ab, so dass sich nach dieser Verteilung mit einem variierenden CaCO_3 -Gehalt zwischen 46,6 und 55,8 mol % 2 Häufigkeitsmaxima bei 50 und bei 54 - 55 mol % CaCO_3 ausgehalten werden können. Ähnliche Verteilungsmuster wurden auch von SPERBER et al. (1984) für phanerozoische Dolomite Nordamerikas und von SCHMITZ (1985) für Dolomite der Unteren und Mittleren Kreide aus dem westlichen Hohen Atlas beschrieben.

Die CaCO_3 -Gehalte der Dolomite korrelieren deutlich mit den beobachteten Kristallstrukturen der Dolomite. Während die mikritischen synsedimentären bis frühdiagenetisch entstandenen Dolomite mit sub- bis euhedralen Kristallen eine nahezu stöchiometrische Zusammensetzung oder einen Mg-Überschuss aufweisen, zeichnen sich die überwiegend sub- bis anhedralen, mikrosparitischen bis sparitischen, spätdiagentischen Dolomite durch Ca-Überschüsse aus, wobei mit zunehmender Kornvergrößerung eine Zunahme des CaCO_3 -Gehaltes in den Proben festzustellen ist. Eine besondere Aufmerksamkeit muss auf die Dolomite der Oberen Schaumkalkbank gerichtet werden. Diese sind überwiegend sparitisch, ihre Kristalle überwiegend hypidiomorph bis ideomorph ausgebildet. Mit einem CaCO_3 -Gehalt von 50,0 - 50,5 mol % zeigen sie eine stöchiometrische Zusammensetzung. In Anlehnung an LUMBSEN & CHIMAHUSKY (1980) sowie MORROW (1978) werden diese Dolomite als spätdiagenetische Bildungen gedeutet.

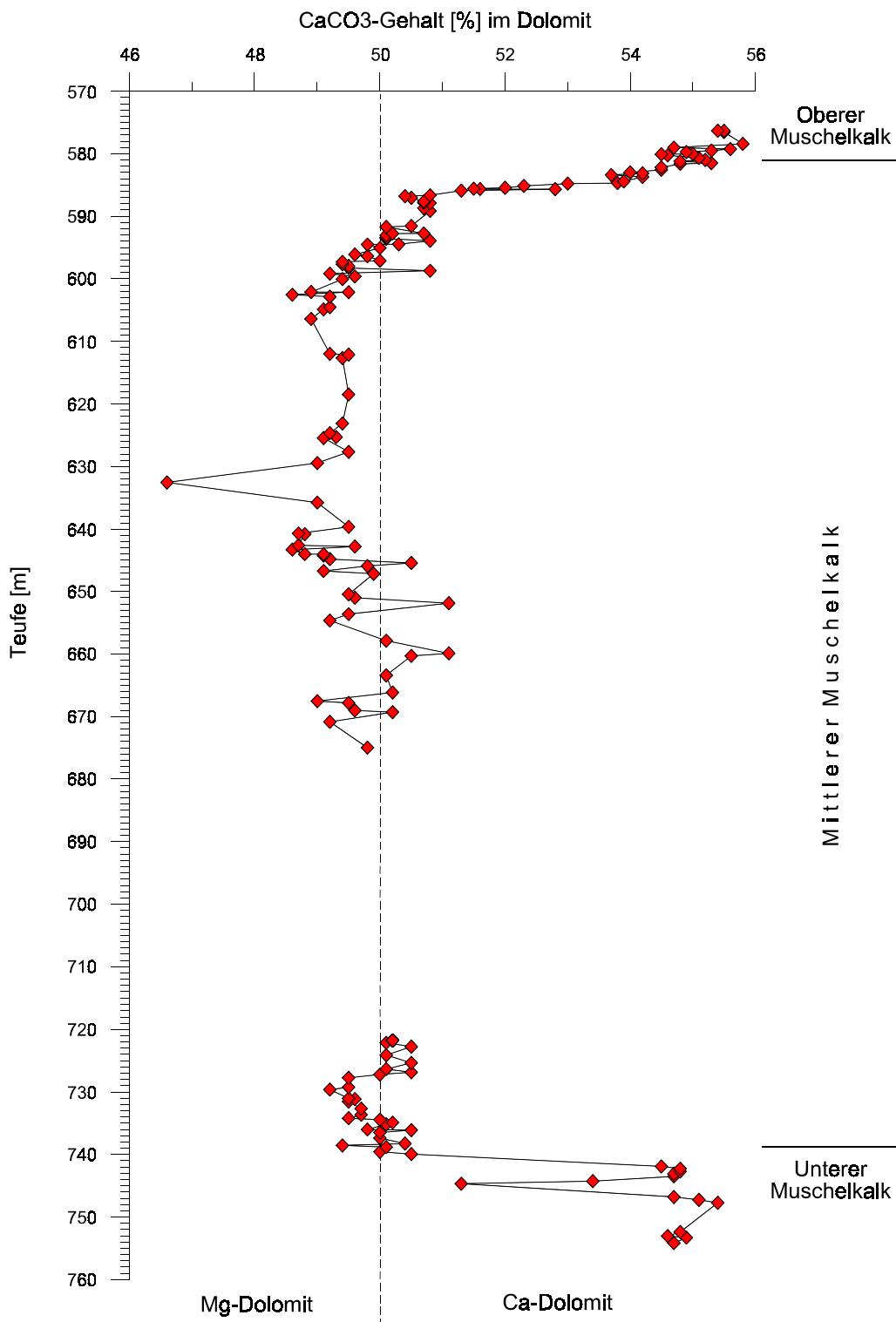


Abb. 23: Ca-Gehalte im Dolomit

Betrachtet man die stratigraphische Verteilung von stöchiometrischem Dolomit und Ca-Dolomit (Abb. 23) wird deutlich, dass beide stratigraphisch kontrolliert an einzelne Schichtkomplexe gebunden sind. Der Dolomit-Chemismus ändert sich schichtparallel. Ca-Dolomite treten dabei im obersten Abschnitt des Unteren Muschelkalks, am Top des Mittleren Muschelkalks und im Trochitenkalk auf. In diesen Profilabschnitten ist kein stöchiometrischer Dolomit zu finden. Der Wechsel im Dolomit-Chemismus korreliert mit den Veränderungen im Ablagerungsmilieu. Die Dolomite des salinaren Milieus

des Mittleren Muschelkalks, die sich durch Algenbildungen, eine gute Strukturerhaltung und Dolomitkristalle im Mikritbereich auszeichnen, werden von $\text{Ca}_{48,5-51,1}$ -Dolomiten aufgebaut. In den normal marinen Abschnitten im Liegenden und Hangenden der salinaren Dolomite treten grüberkristalline, succrose $\text{Ca}_{51,5-55,6}$ -Dolomite der Spätdiagenese auf. Die Dolomitisierung erfolgte langsam (große Kristalle) und wahrscheinlich aus Lösungen mit einem geringen Mg/Ca-Verhältnis. SPERBER et al. (1985) nehmen an, dass dolomitische Kalke, die rhomboedrische Ca-Dolomite enthalten, während der Umwandlung von Mg-Calcit in Low-Mg-Calcit und Dolomit in einem geschlossenen diagenetischen System entstanden sind, so dass in diesen Gesteinen letztendlich ein Überschuss an Mg^{2+} auftritt.

Die Verteilung der Dolomittypen wird somit von Prozessen im Sedimentationsraum gesteuert. Eine rasche wechselhafte Abfolge von Dolomittypen konnte im untersuchten Profilabschnitt der Bohrung Remlingen 7 nicht beobachtet werden, so dass der Dolomittyp nur längerfristige Veränderungen widerspiegelt. Der Wechsel der Zusammensetzung der Dolomite an der Basis sowie im obersten Abschnitt des Mittleren Muschelkalks zeichnet somit die Veränderung der Salinität im Ablagerungsmilieu nach. Während der abrupte Wechsel von Ca-Dolomit zu stöchiometrischem Dolomit an der Basis des Mittleren Muschelkalks auf eine rasche Erhöhung der Salinität hindeutet, vollzieht sich der Übergang im oberen Abschnitt des Mittleren Muschelkalks kontinuierlich. Innerhalb der einzelnen Profilabschnitte mit stöchiometrischem Dolomit und Mg-Dolomit bzw. Ca-Dolomit treten somit nie Dolomite der jeweils anderen Zusammensetzung auf, so dass die jeweiligen Dolomit-Bildungsbedingungen relativ konstant waren.

Einzelne Dolomitkristalle weisen einen deutlichen Zonarbau auf. Dieser deutet auf mehrfache abrupte kristallchemische Wechsel im Ca- sowie auch im Mn- und Fe-Gehalt der Porenwässer während des Kristallwachstums hin (Taf. 36/1). Die Dolomitkristalle zeigen dabei oft einen wolkigen rhomboedrischen Kern und einen klaren Saum. Der wolkige Kern wird auf Einschlüsse, calcitische Mineralrelikte und leere oder fluidgefüllte Mikroklüfte zurückgeführt (SIBLEY 1980, TUCKER & WRIGHT 1990). Die Mineralrelikte zeigen, dass während des Frühstadiums der Dolomitisierung die Fluide nicht in der Lage waren, das CaCO_3 vollständig zu lösen. Nach MURRAY (1964) reicht der Kristallisationsdruck zu Beginn des Dolomitwachstums noch nicht aus, um den Calcit und die Verunreinigungen im Calcit vollständig zu verdrängen. Mit zunehmender Dolomitisierung wird ein freieres Dolomitwachstum möglich, ein einschlusarmer bis -freier Dolomit kann entstehen. Neben einem einfachen Zonarbau wird ein mehrfacher Zonarbau beobachtet.

5.7.3 Spurenelementverteilungen in den Karbonaten

Nach WEDEPOHL (1970) ist es bei einer geochemischen Analyse von Karbonatgesteinen erforderlich, die gering konzentrierten karbonatisch gebundenen Spurenelemente zu erfassen, da eine Analyse des Gesamtgestein im wesentlichen durch die höheren Spurenelement-Gehalte des silikaklastischen Rückstands kontrolliert wird. Dazu wurden kalte Salzsäure-Auszüge hergestellt, in denen die an die Karbonatphase gebundenen Elemente Sr, Fe, Mn und Na mit Hilfe der optischen Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) (s. Kap.3.4.2) bestimmt wurden.

5.7.3.1 Strontium

Das Strontium gilt als aussagekräftigstes Spurenelement in der Karbonatgeochemie. Meerwasser enthält ca. 0,008 ‰ Strontium (BRAITSCH 1971). Während der Karbonatsedimentation wird Strontium bevorzugt in den Aragonit eingebaut. Nach VEIZER (1983) liegen die theoretischen Sr-Gehalte von Aragonit zwischen 7 000 - 9 400 ppm. Diese Werte korrespondieren sehr gut mit den Sr-Gehalten für rezente aragonitische Karbonatschlämme (9 400 ppm) und Ooide der Trucial Coast (9 600 ppm, TUCKER & WRIGHT 1990). Anorganisch gefällter mariner Calcit weist hingegen lediglich Sr-Gehalte zwischen 1 000 - 1 200 ppm auf (KINSMAN 1969). Den wichtigsten Einfluss auf die Sr-Gehalte in fos-

silen Karbonaten besitzen die Prozesse der Diagenese sowie die Salinität des Ablagerungsmilieus, der Tongehalt der Karbonatsedimente und der Umfang und Zeitpunkt der Dolomitisierung (BAUSCH 1968). Bei der Umkristallisierung der primären Karbonatminerale, insbesondere bei der Aragonit/Calcit-Umkristallisation tritt eine Strontiumverarmung aufgrund der geringen Strontiumaufnahmefähigkeit des Calcits ein (KINSMAN 1969). VEIZER & DEMOVIC (1974) sehen jedoch vielmehr Unterschiede in der primären mineralogischen Zusammensetzung des Sediments als Ursache dieser geringen Sr-Gehalte.

Moderne supratidale, frühdiagenetische Dolomite des Arabischen Golfs, der Bahamas und der Florida Keys besitzen Sr-Gehalte von ca. 600 ppm (BEHRENS & LAND 1972, LAND & HOOPS 1973). Im Gegensatz dazu weisen spätdiagenetische Dolomite geringere Sr-Gehalte auf. Fossile Dolomite zeigen in Abhängigkeit des Bildungsmilieus ebenfalls deutlich geringere Gehalte (50 - 250 ppm Sr). LAND (1980) und HARDIE (1987) sehen in der Umkristallisation oberflächennah gebildeter, Ca-reicher Dolomite in stöchiometrische Dolomite die Ursache für die Strontiumabnahme. Nach VAHRENKAMP & SWART (1990) sind die geringen Sr-Gehalte in den fossilen Dolomiten nicht auf einen Strontiumverlust in Folge der Umkristallisation in stöchiometrische Dolomite zurückzuführen, vielmehr sind sie als unveränderte Gehalte primär stöchiometrischer Dolomite aufzufassen. Eine gute Korrelation zwischen den Sr-Gehalten und den Calciumüberschüssen der Dolomite konnten in den tertiären Dolomiten der Bahamas nachgewiesen werden (VAHRENKAMP & SWART 1990).

Die Sr-Gehalte zeigen innerhalb der einzelnen Faziesgruppen deutlichen Schwankungen. Die variierenden Gesteinszusammensetzungen (Calcit, Dolomit, Anhydrit und unlöslicher Rückstand) sind im wesentlichen dafür verantwortlich. Innerhalb der Karbonatfazies weisen die Proben des Oberen Muschelkalks, die durch die Faziestypen des Oobiosparits und des Oobiomikrits repräsentiert werden, die geringsten Sr-Mittelwerte von 377 ppm bzw. 316 ppm auf. Dem gegenüber stehen die deutlich erhöhten Mittelwerte der Faziestypen Mikrit (4 550 ppm) und Calcisiltitlaminit (2 206 ppm), die auf Coelestinanreicherungen zurückgeführt werden. Schwankungen der Sr-Gehalte finden sich auch innerhalb der Dolomitfazies mit Mittelwerten für die einzelnen Faziestypen von 438 - 1 009 ppm. Eindeutige Abhängigkeiten können jedoch nicht aufgezeigt werden. Ein stark erhöhter Sr-Wert von 6 039 ppm (Probe RL93) wird auf Coelestin zurückgeführt, der röntgenographisch nachgewiesen werden konnte.

Eine Korrelation des Strontiums mit den Calciumüberschüssen im Dolomit kann für die Dolomite des Mittleren Muschelkalks nicht nachgewiesen werden. Eine geringe Korrelation des Strontiums mit dem unlöslichen Rückstand ($r = -0,281$) wird beobachtet.

5.7.3.2 Eisen und Mangan

Mangan und Eisen kommen in sehr geringen Konzentrationen im Meerwasser vor, allerdings können diagenetische Porenlösungen in Abhängigkeit vom Redoxpotential erhöhte Mangan- und Eisengehalte aufweisen. Meerwasser enthält im Durchschnitt 0,2 ppb Mn. Anorganisch gefällter Calcit enthält 10 ppm Mangan, Aragonit zwischen 0,1 und 0,6 ppm Mn. Sowohl Mangan als auch Eisen reichern sich während der Aragonit-Calcit-Transformation unter meteorischen Bedingungen an (TUCKER & WRIGHT 1990). Eisenreiche Calcite und Dolomite werden als spätdiagenetische Bildungen interpretiert.

Die Mn-Gehalte der einzelnen Faziestypen unterscheiden sich deutlich. Mangan korreliert signifikant mit dem Calcit- und Dolomitgehalt, zeigt jedoch keine Korrelation mit dem Unlöslichen Rückstand.

Während die Faziestypen der Calcitfazies Mn-Mittelwerte von 83 - 229 ppm aufweisen, sind die Faziestypen der Dolomitfazies manganreicher (174 - 297 ppm). Dabei weisen die Faziestypen Mikrit und Calcisiltitlaminit die geringsten Mn-Gehalte auf (38 - 155 ppm), wobei die höheren Mn-Gehalte innerhalb dieser Faziestypen an die spätdiagenetische Dolomitisierung geknüpft sind. Oobiomikrite

und -sparite zeigen mit 176 - 240 ppm deutlich höhere Mn-Werte, die auf eine Calcitisierung von primär aragonitischen Ooiden sowie auf diagenetische Calcitzemente zurückgeführt werden. Die erhöhten Mn-Werte der Dolomitfaziestypen werden als Hinweis auf reduzierende Bildungsbedingungen gewertet, die im hypersalinaren Milieu bereits wenige Zentimeter unterhalb der Sedimentoberfläche angetroffen werden können (MACHEL & MOUNTJOY 1986).

Die Eisengehalte zeigen mit Werten von 273 ppm - 6 928 ppm eine sehr hohe Streuung, wobei Oobiomikrit und -sparit relativ einheitliche Werte von 385 - 549 ppm aufweisen. Die deutlich erhöhten Eisenwerte werden auf leichtlösliche Eisenoxide und -hydroxide zurückgeführt, die während des Säureaufschlusses mit in Lösung gegangen sind. Der Eisengehalt zeigt eine signifikante Korrelation mit dem unlöslichen Rückstand (IR, $r = 0,406$). Eisendolomit konnte mikroskopisch nicht nachgewiesen werden.

5.7.3.3 Natrium

Meerwasser enthält ca. 10,56 ‰ Natrium (BRAITSCH 1971). Nach LAND & HOOPS (1973) kann Natrium proportional zur Salinität in das Karbonatgitter aufgenommen werden. Rezente Dolomite der Florida Bay, der Bahamas und des Persischen Golfes weisen Na-Gehalte zwischen 1 000 und 3 000 ppm auf. Dennoch ist Natrium als Salinitätsindikator problematisch. Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass Natrium als Na_2CO_3 im Calcitgitter eingebaut sein kann oder Gitterfehlstellen besetzt. Der Na-Gehalt in den Dolomiten kann nach FRITZ & KATZ (1972) erstens auf gelöstes NaCl in Flüssigkeitseinschlüssen im Dolomitgitter, zweitens auf Natriumionen, die für Calcium und/oder Magnesium in das Dolomitgitter eingebaut werden und drittens auf Verunreinigungen durch natriumhaltige nichtdolomitische Minerale, wie z. B. Tone, zurückgeführt werden. HARDIE (1987) geht hingegen davon aus, dass das einwertige Natriumion trotz ähnlicher Größe das zweiwertige Calciumion nicht ersetzen kann. Natrium liegt hauptsächlich als Kristall- und Flüssigkeitseinschluss im Wirtskristall vor (BEIN & LAND 1983). M'RABET (1981) nimmt eine Bindung des Natriums an Tonmineralien, Eisen- und Manganoxide sowie -hydroxide an. Eine Bindung an das Dolomitgitter kommt nicht vor.

Die Na-Werte reichen von 300 ppm - 19 000 ppm, wobei die stark erhöhten Werte ($> 7\,000 \text{ ppm}$) in Tonsteinen bzw. Tonmergelsteinen gemessen wurden. Es muss somit davon ausgegangen werden, dass in Säuren relativ leicht lösliche Oxide und Hydroxide bei der Probenaufbereitung mit in Lösung gegangen sind. Mit geringen Na-Gehalten (306 - 976 ppm) heben sich vor allem die gering dolomitierten Calcite (Dolomitgehalt $< 10\%$) des Unteren und Oberen Muschelkalks deutlich von den Dolomiten des Mittleren Muschelkalks ab. Auch lassen die Na-Gehalte eine Verteilung entsprechend der Fazies erkennen. Die Faziestypen der Dolomitfazies zeigen mit Mittelwerten von 3 056 ppm (Algenlaminit), 3 197 ppm (Dolosiltlaminit) und 3 479 ppm (Dolomikrit) die höchsten Gehalte, während die Na-Gehalte der Calcifazies mit Mittelwerten von 624 ppm (Oobiosparit) und 613 ppm (Oobiomikrit) bzw. 1 697 ppm (Calcisiltlaminit) und 2 219 ppm (Mikrit) deutlich geringer sind. Die hohen Na-Gehalte in den Dolomiten belegen hypersalinare Bildungsbedingungen. Die Verteilung der Messwerte lässt keinen Bezug zur Zyklischen Gliederung erkennen.

Die signifikanten Korrelationen mit dem unlöslichen Rückstand ($r = 0,63$) und mit den Calciumüberschüssen der Dolomite ($r = 0,334$) lassen jedoch keine eindeutigen Aussagen zum Bindungsverhalten des Natriums zu.

5.7.4 Geochemie der Evaporite

5.7.4.1 Strontium

In salinaren Abfolgen ist Strontium an die Minerale Anhydrit, Polyhalit und auch Halit gebunden, wobei es bei fortschreitender Evaporation zunehmend in das Ca-Sulfatgitter eingebaut wird. Daneben tritt Coelestin als eigenständiges Mineral in salinar beeinflussten Formationen auf.

Nach USDOWSKI (1973) liegen die Sr-Gehalte von Gips zu Beginn der CaSO_4 -Phase zwischen 1 100 und 1 200 ppm. Bei Beginn und zu Ende der NaCl -Phase betragen sie 2 100 - 2 300 ppm bzw. 8 900 - 9 750 ppm. Die mittlere Sr-Konzentration von Gips beträgt 1 600 - 1 800 ppm. Nach Umwandlung in Anhydrit resultiert ein Sr-Gehalt von 2 020 - 2 290 ppm. Diese Werte stimmen recht gut mit Sr-Gehalten von rezenten und älteren Anhydriten überein (KINSMAN 1964, MÜLLER 1962). Würde Anhydrit bereits zu Beginn der Sulfatphase abgeschieden, müsste dieser nach USDOWSKI (1973) hingegen einen Sr-Gehalt von 29 200 ppm aufweisen. Somit lässt sich aufgrund des Sr-Gehaltes ein primärer Anhydrit von einem sekundär durch Umwandlung von Gips hervorgegangenem Anhydrit unterscheiden.

In den Sulfaten (Gruppe 3) des Mittleren Muschelkalks der Bohrung Remlingen 7 wurden Sr-Gehalte zwischen 1 276 und 33 148 ppm ermittelt, wobei deutlich erhöhte Sr-Gehalte von >7 000 ppm (Proben RL 62, RL 63, RL 113) auf Coelestinbeimengungen zurückgeführt werden. In diesen Proben aus der Heilbronn-Formation wurde Coelestin röntgenographisch nachgewiesen. Es ist davon auszugehen, dass es sich hierbei um salinaren, synsedimentär gebildeten Coelestin handelt. Aus experimentellen Löslichkeitsbestimmungen von Coelestin in Meerwasser verschiedener Eindampfungsstadien ist bekannt, dass bei einer Konzentrationserhöhung auf das 3-fache das Löslichkeitsprodukt für SrSO_4 überschritten wird und Coelestin ausfällt (MÜLLER & PUCHELT 1961). Größere Coelestananreicherungen sind im Norddeutschen Becken aus dem Malm-Salinär von Hemmelte-West (Süd-Oldenburg, MÜLLER 1962) bekannt. Daneben finden sich Coelestinvorkommen im Röt, im Unteren Muschelkalk und an der Basis des Mittleren Muschelkalks (u. a. RIECH 1978, BAUTSCH & DAMASCHUN 1995, HOFFMANN 1995). Diese werden jedoch als diagenetische Bildungen gedeutet. Während der Diagenese wird Sr mobilisiert. Dies erfolgt sowohl durch die Umkristallisation von Aragonit als auch durch die Lösung von SrSO_4 . Beide Mineralien werden auf Lebewesen zurückgeführt, die Stützgerüste aus Aragonit und SrSO_4 produzieren. Nach LANGBEIN (1967b) kommen die strontiumreichen Anhydrite des Mittleren Muschelkalks als Sr-Lieferant in Frage. Sr wird dabei bei der Hydratation von Anhydrit in Gips freigesetzt. Es erfolgte eine Sr-Infiltration in tiefere Gesteinsschichten. In den untersuchten Proben der Jena- und der Karlstadt-Formation konnten ebenfalls geringe Mengen an Coelestin nachgewiesen werden. Eine diagenetische Bildung wird postuliert.

Vernachlässigt man die coelestinhaltigen Proben liegt der Sr-Mittelwert in den Anhydriten bei ca. 2 400 ppm. Diese Konzentration entspricht annähernd dem mittleren Gehalt des aus dem Gips der CaSO_4 -Phase hervorgegangenen Anhydrits. Einzelne Proben (RL 58, RL 59, RL 64), in denen röntgenographisch Halitbeimengungen nachgewiesen werden konnten, haben Sr-Gehalte die dem Beginn der NaCl -Phase entsprechen. Weitere Abweichungen der absoluten Sr-Werte von denen der CaSO_4 -Phase werden auf geringfügige, röntgenographisch nicht nachweisbare Coelestinbeimengungen zurückgeführt.

Ein weiterer wichtiger Sr-Träger in der salinaren Abfolge ist der Polyhalit. Die Ca-Sr-Substitution findet im CaSO_4 des Polyhalits statt. Untersuchungen von K. BACHMANN (1985) zeigten, dass in Polyhalit um den Faktor 2,5 weniger Sr eingebaut wird als in Anhydrit.

Die Sr-Gehalte der Halite schwanken zwischen 35 - 2 689 ppm (Abb. 24). Diese Werte liegen deutlich unter denen der Sulfate. Sie werden auf das geringe Bindungsvermögen des Strontiums im Halit zurückgeführt. Nach MÜLLER (1962) sind im Halit, der einen Anteil von 77,82 % an den Evaporiten hat,

nur 1,06 % Sr enthalten. Als durchschnittlichen Sr-Gehalt von Haliten unterschiedlicher Formationen gibt MÜLLER 3 ppm an. Halit hat somit als Sr-Träger kaum eine Bedeutung. Verunreinigungen der Salze durch Anhydrit, Polyhalit und möglicherweise Coelestin werden als Ursache für die ermittelten, deutlich höheren Sr-Werte angesehen.

5.7.4.2 Brom in den Haliten

Das Element **Brom** gilt als ein hervorragender Indikator der Salinität und von Salinitätsschwankungen. Aus diesem Grunde wurden in den steinsalzführenden Zyklen der Bohrung Remlingen 7, in den Zyklen 3 und 4, die Brom-Gehalte untersucht. Die ermittelten Br-Werte sind relativ niedrig und schwanken im allgemeinen von 11 - 125 ppm. Zu ähnlichen Werten, Br-Gehalte zwischen 63 - 119 ppm, gelangen REBELLE & STEMPER (pers. Mitt.), die ebenfalls Steinsalze der Bohrung Remlingen 7 analysierten.

Während der Evaporation zeigt der Br-Gehalt einen progressiven linearen Anstieg, mit einem Versteilen der Kurve nach einer Halitausfällung. Erste Halitausfällungen nach dem Erreichen der Halitsättigung haben Br-Gehalte von ca. 70 ppm, vor dem erstmaligen Auftreten anderer Salze erreicht die Bromkonzentration in den Haliten ca. 200 - 300 ppm. Geringere Gehalte werden auf Halitlösung durch Zuflüsse und Wiederausfällung zurückgeführt. Es entstehen die sogenannten „second-cycle“-Halite (HOLSER 1966, 1979). So können z. B. die nach einer Lösung von Kaliumsalzen (hohe Br-Gehalte) ausgefällten Halite erhöhte Bromgehalte aufweisen.

Im untersuchten Profil weisen die relativ niedrigen Bromgehalte auf insgesamt frühe Halitbildungen innerhalb der salinaren Abscheidungsfolge hin (DELLWIG 1966, KÜHN 1968). Im Zyklus 3 können zwei Abschnitte mit jeweils leicht steigenden Bromgehalten unterschieden werden (Abb. 24). Jedoch lässt sich der Beginn des zweiten Abschnittes nicht mit einer eindeutigen Salinitätserniedrigung, wie sie durch Anhydritlagen im Salz angezeigt wird, korrelieren. Vielmehr kommen die höchsten Bromgehalte der Salze des ersten Abschnittes in Anhydritablagerungen vor. Der Verlauf der Br-Kurve im Zyklus 4 zeigt wenig Hinweise auf eine progressive Eindunstung, die Br-Gehalte schwanken zwischen 50 - 120 ppm. Geringere Bromgehalte deuten auf synsedimentäre Halitaufarbeitung sowie Verunreinigungen des Salzes hin.

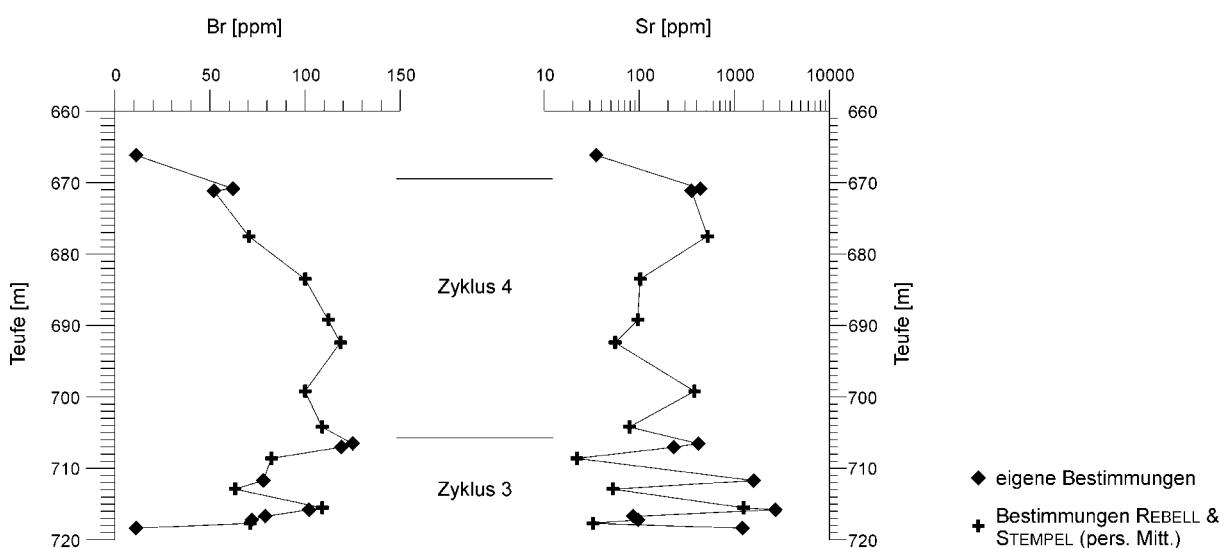


Abb. 24: Die Verteilung der Br-Gehalte im Salz des Mittleren Muschelkalks, ergänzt mit Bestimmungen von REBELLE & STEMPER (pers. Mitt.)

Das diagenetisch entstandene, rote Faser-Steinsalz im Störungsbereich (Probe RL66, 666,10 - 666,24 m) zeigt mit 11 ppm besonders geringe Bromgehalte. Seine Entstehung wird auf Zuflüsse, die gelöste Salze enthalten, zurückgeführt.

Für die aus der Bohrung Remlingen 7 untersuchten Salze des Mittleren Muschelkalks kann ein systematisch steigender Bromgehalt innerhalb der Zyklen als Ausdruck sich erhöhender Salinität nicht eindeutig nachgewiesen werden. Es wird daher angenommen, dass die Salze des Mittleren Muschelkalks, die durch das Fehlen eines gut entwickelten Bromprofiles gekennzeichnet sind, in einem weitläufigen, flachen Becken abgelagert wurden. Dies steht im Einklang mit HOVARKA (1987).

5.7.5 Clusteranalyse des Mittleren Muschelkalks

Ähnlichkeitsbeziehungen innerhalb einer Datenmenge können bei der Clusteranalyse aufgezeigt und anschaulich dargestellt werden.

Die Ergebnisse der hierarchischen Clusteranalyse sind im Dendrogramm abgebildet (Abb. 25). Die untersuchten Elemente bilden deutliche Cluster aus, die sich einzelnen Gesteinsgruppen zuordnen lassen.

Der erste Cluster wird durch Elemente, die der **terrigenen Komponente** zugeordnet werden, gebildet. Dazu zählen: Ti, Al, Si, Fe, V, Cr, Zn, Na, K, Mn, Y, Ba, Mg, As, Zr, Cu, Sc, Sr, Ca, Cl, B.

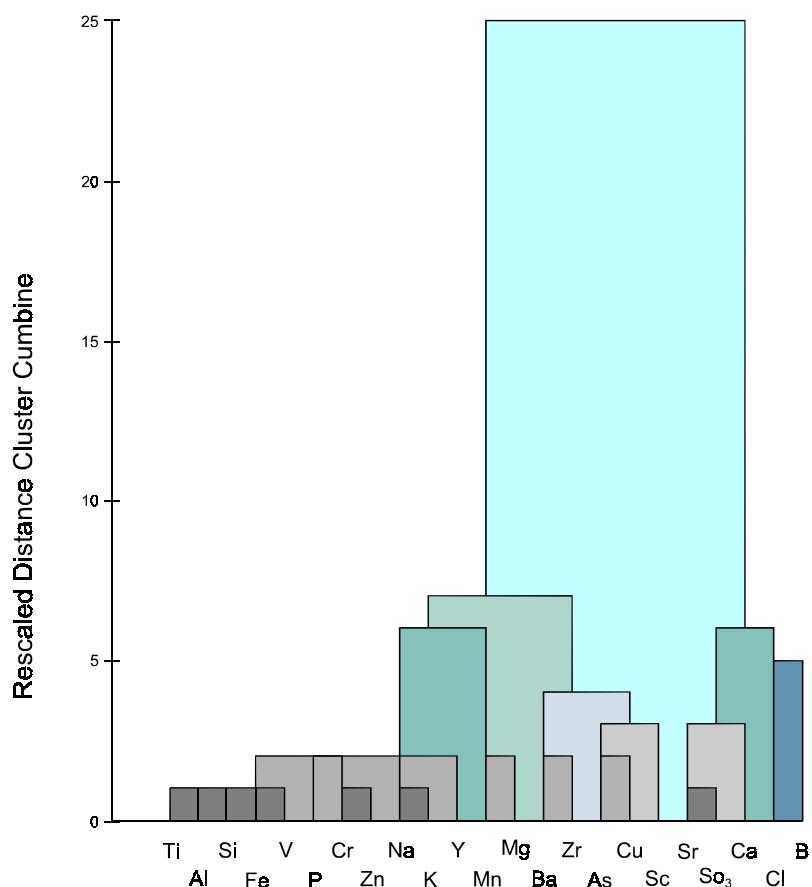


Abb. 25: Hierarchische Clusteranalyse der Elemente des Mittleren Muschelkalks

Der zweite Cluster wird durch die Elemente Mg sowie Mn bestimmt, die im Mittleren Muschelkalk allgemein der **dolomitischen Komponente** zugeordnet werden. Jedoch muss von einer **Mehrfachbindung** dieser Elemente ausgegangen werden, da der Mg-Mn-Cluster in einem weiteren Schritt der Analyse mit den Elementen der terrigenen Phase zusammengefasst wird. Auffällig ist weiterhin, dass zwar Ca im Dolomit gebunden ist, doch eine Korrelation unterdrückt wird.

As, Ba, Cu, Sc, Zr bilden zu Beginn der Clusteranalyse ebenfalls eine eigenständige Gruppe, werden später aber mit dem terrigenen Cluster zusammengefasst, so dass sie ebenfalls der **terrigenen Komponente** zugeordnet werden.

Ca bildet zusammen mit SO₃, Sr sowie Cl und Sc den vierten Cluster, der auf die **sulfatische Komponente** innerhalb des Mittleren Muschelkalks zurückgeführt wird.

Die Clusterzentrenanalyse hat das Ziel, Gruppen ähnlicher Fälle (Proben) herauszufinden. Entsprechend der hierarchischen Clusteranalyse sollten die Proben vier Clustern zugeordnet werden. In der Abb. 26 wird die Zugehörigkeit der einzelnen Proben entsprechend ihrer Gesteinsklassifikation zu den sich ergebenen Clustern, in Tab. 14 die mittleren Elementgehalte der Cluster dokumentiert. Es wird deutlich, dass die bei dieser Analyse erzeugten Cluster sehr gut mit den Gesteinsklassen korrelieren.

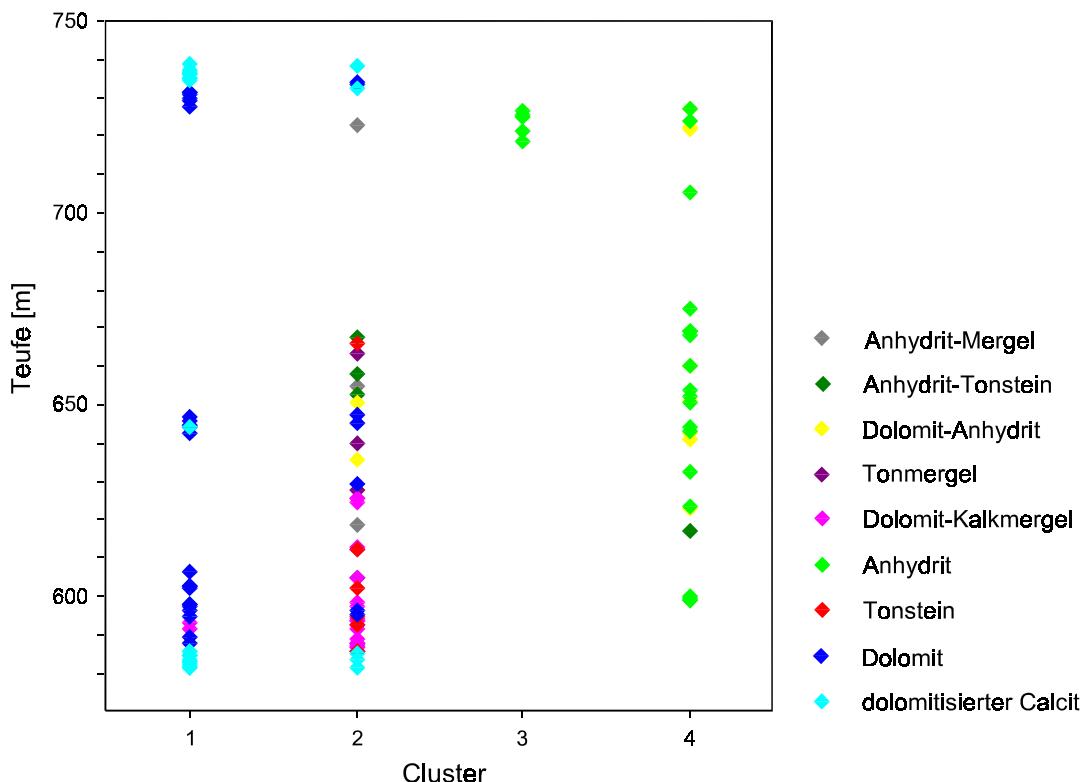


Abb. 26: Clusterzentrenanalyse der Proben des Mittleren Muschelkalks mit der Vorgabe, vier Cluster zu bilden

Dabei repräsentiert der erste Cluster mit 45 Proben die Karbonate. Charakteristisch sind die höchsten Mg-Mittelwerte, sowie die niedrigsten Sr-Mittelwerte, ein Hinweis auf eine Dominanz von Dolomit im Karbonatcluster. Tonige Mischgesteine bilden mit 51 Proben den zweiten Cluster, der die höchsten Mittelwerte der terrigen gebundenen Elemente, u. a. Si, Al, Fe, As, Cr, Cu enthält. Der dritte Cluster wird von lediglich 5 Proben aufgebaut. Es handelt sich hierbei um fast reine Anhydrite, der errechnete Anhydritgehalt liegt bei über 90 %. Typisch sind deutlich erhöhte Mittelwerte an Ca sowie

SO_3 . Der Sr-Mittelwert beträgt 1 735 ppm. Im vierten Cluster (29 Proben) sind die etwas stärker verunreinigten Anhydrite zusammengefasst. Ein gegenüber dem dritten Cluster deutlich erhöhter Sr-Mittelwert (4 045 ppm) wird als ein Hinweis auf Coelestinvorkommen innerhalb des Clusters gewertet. Neben hohen Mittelwerten an Ca und SO_3 ist ein hoher Ba-Mittelwert auffällig, der auf einen isomorphen Einbau von Ba in Coelestin zurückgeführt wird. Um die Anhydrite möglichst zu einem Cluster zu vereinigen, wurde eine weitere Clusterzentrenanalyse durchgeführt mit dem Ziel, die Proben drei Clustern zuzuordnen.

Die Clusterzugehörigkeit der Proben ist in Abb. 27 dargestellt. Die einzelnen Cluster lassen sich wiederum den Gesteinsgruppen der Sulfate, der tonigen Mischgesteine und der Karbonate zuordnen, jedoch lassen sich die Cluster nicht immer eindeutig den ausgehaltenen Gesteinsklassen zuordnen. Die mittleren Elementgehalte der Cluster sind in Tab. 15 wiedergegeben.

Cluster 1, der 24 Proben umfasst, zeichnet sich durch hohe Gehalte an SO_3 , Ca, Sb, Sr und Zr aus. Die Hauptelemente Si, Al und Mg zeigen wie auch die Spurenelemente geringe Konzentrationen. Dieser Cluster repräsentiert den Gesteinstyp „Sulfat/Anhydrit“. Jedoch werden diesem Cluster ebenfalls einzelne Proben zugeordnet, die neben einem hohen Ca-Gehalt nur geringe Gehalte an SO_3 aufweisen.

Cluster 2 gibt mit 33 Proben den Gesteinstyp des tonigen Mischgestein wieder. Charakteristisch sind hohe Konzentrationen an den Hauptelementen Si, Al, Fe, Ti sowie an Spurenelementen.

Cluster 3 bildet mit 73 Proben den vom Umfang her größten Cluster und zeichnet sich gegenüber Cluster 1 und 2 durch die höchsten Mg-Mittelwerte aus. Alle weiteren Elementgehalte liegen stets zwischen den Gehalten der beiden anderen Cluster. Dieser Cluster ist kennzeichnend für die Karbonate, sowie untergeordnet stärker verunreinigte Karbonate, die hohen Mg-Gehalte weisen auf Dolomit hin.

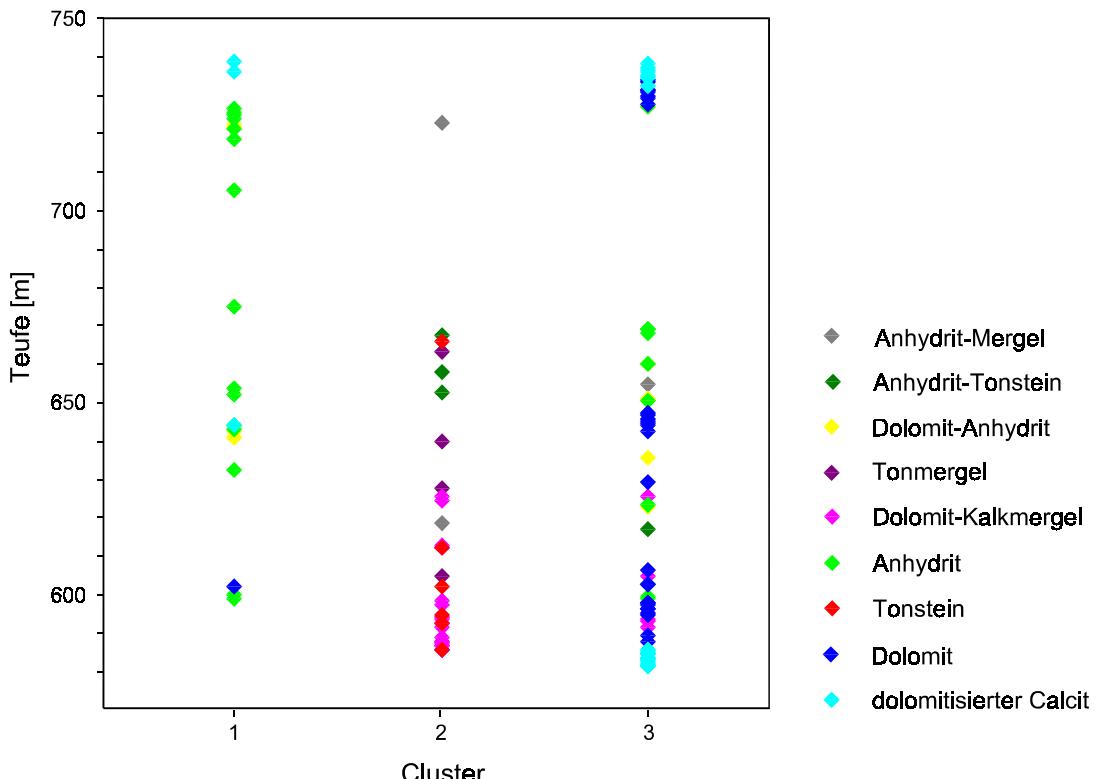


Abb. 27: Clusterzentrenanalyse der Proben des Mittleren Muschelkalks mit der Vorgabe, drei Cluster zu bilden

5.7.6 Stratigraphisch-geochemische Korrelation

Zu einer stratigraphisch-geochemischen Korrelation werden die Profile der Elementkonzentrationen der Gamma-Ray-Kurve gegenübergestellt (Anl. 5, 6), so dass sich die unterschiedlichen geochemischen Charakteristiken erkennen lassen. Es wird deutlich, dass sich verschiedene Elemente gleichartig verhalten. Zusätzlich zeigt sich, wie sich die chemische Zusammensetzung der untersuchten Gesteine im Bereich stratigraphisch-lithologischer Grenzen ändert. In Abb. 28 sind die Elementkonzentrationen für die Formationen des Mittleren Muschelkalks gegenübergestellt.

5.7.6.1 Die Grenze Unterer/Mittlerer Muschelkalk

Die Grenze Unterer/Mittlerer Muschelkalk ist im Profil von keinem eindeutigen Umschwung des Chemismus begleitet.

Lediglich Sr zeichnet die Grenze deutlich nach, gegenüber der unterlagernden Oberen Schaumkalkbank ist an der Basis des Mittleren Muschelkalks eine starke Abnahme des Sr-Gehaltes zu verzeichnen. Dies wird auf stellenweise Anreicherungen von Coelestin im Bereich der Schaumkalkbänke zurückgeführt. Relativ deutliche Konzentrationsänderungen treten ca. 25 cm über der lithologisch-geophysikalisch definierten Grenze auf. Die Gehalte an den Elementen Si, Al, Fe, K und Na zeigen erhöhte Werte, die Elemente Ca, Mg und Sr geringere Werte. Dieser geochemische Trend spiegelt recht deutlich die an der Basis des Mittleren Muschelkalks auftretenden Veränderungen des Ablagerungsmilieus hin zu ruhigen, strömungsarmen salinaren Sedimentationsbedingungen wieder.

Das Ca/Mg-Verhältnis zeichnet die Grenze nur sehr ungenau nach. Sekundäre Dolomitisation hat bereits zu einer Erhöhung der Mg-Werte in den obersten Metern des Unteren Muschelkalks geführt (Abb. 29). Der Dolomitchemismus ändert sich hingegen stratiform. Während im Unteren Muschelkalk Ca-Dolomite dominieren, tritt mit Beginn des Mittleren Muschelkalks stöchiometrischer Dolomit auf (Abb. 23).

5.7.6.2 Mittlerer Muschelkalk

Für viele Elemente lassen sich einheitliche Entwicklungstendenzen der Konzentrationen innerhalb der Zyklen aufzeigen. Dies gilt insbesondere für die Elementverteilungen innerhalb der Zyklen der Heilbronn-Formation. Der Karbonatchemismus zeigt im Mittleren Muschelkalk keine eindeutigen Veränderungen. Jedoch sind die Karbonate des Unteren und Oberen Muschelkalks (reine und spätdiagenetisch dolomitisierte Calcite) im allgemeinen Na- und Mn-reicher als die Dolomite des Mittleren Muschelkalks.

Geochemisch lässt sich die Karlstadt-Formation (Zyklus1) anhand der Elementkonzentrationen deutlich dreiteilen. Diese Untergliederung korreliert dabei sehr gut mit dem Verlauf der Gamma-Ray-Kurve. Für den basalen Abschnitt, der den *orbicularis*-Schichten entspricht, zeigen die Elemente der terrigenen Phase (Si, Al, Fe, K, Na) eine Abnahme der Konzentrationen, während die Ca- und Mg-Gehalte zunehmen. Weiterhin sind geringe SO₃- und Sr-Gehalte sowie leicht abnehmende Mn-Gehalte charakteristisch. Die Spurenelemente Cr, Cu, Sb, Sc, V, Y, Zn und Zr-Werte korrelieren in diesem Zyklus mit den Elementen der terrigenen Phase und zeigen einen adäquaten Konzentrationsverlauf, so dass zum Top dieses basalen Abschnitts des Mittleren Muschelkalks mit einer geringen Zunahme der Wasserenergie gerechnet werden muss.

Der mittlere Teil des Zyklus 1 zeigt eine zur Basis gegenläufige Tendenz, die terrigenen Elementkonzentrationen nehmen zu, die Ca-, Mg-, Sr- und Mn-Gehalte ab. Während der unlösliche Rückstand und damit verbunden die Elementkonzentrationen an Si, Al, Fe, K und Na ab einer Tiefe von ca. 733,50 m kontinuierlich abnehmen, der Mg-Gehalt ansteigt sowie die Ca-Konzentration konstant

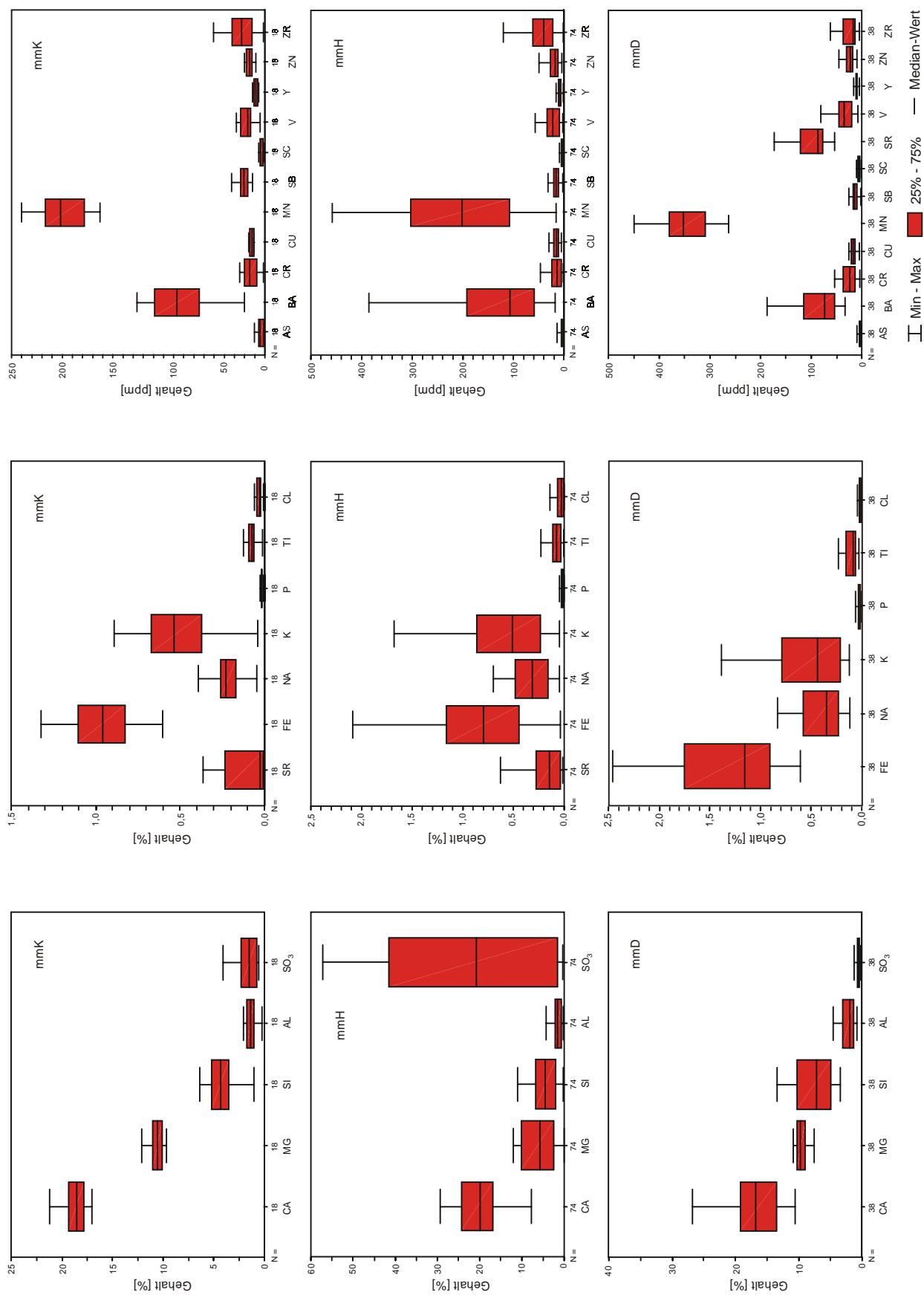


Abb. 28: Boxplots der Elemente - Karlstadt- (mmK), Heilbronn- (mmH) und Diemel- (mmD) Formation im Vergleich

bleibt, ist eine Zunahme an Mn sowie eine Abnahme an Sr erst ab einer Teufe von ca. 731,00 m zu verzeichnen. Ein Ca/Mg-Verhältnis <2 sowie die Dolomikrite belegen eine zunehmende Salinität.

Mit dem Einsetzen der Heilbronn-Formation (Zyklus 2) geht eine deutliche Änderung des Chemismus einher. Gegenüber der Karlstadt-Formation sind deutlich höhere Gehalte an Ca und SO₃, leicht erhöhte Gehalte an den terrigenen Elementen sowie geringe Mg-Konzentrationen charakteristisch. Auffällig sind markant erhöhte Zr-Gehalte. Während Zr innerhalb der Karlstadt-Formation mit den Elementen der terrigenen Phase korreliert, muss in der salinaren Heilbronn-Formation von einer überwiegend sulfatischen Bindung ausgegangen werden. Die terrigenen Elemente zeigen in den Zyklen 5 - 7 eine gleichartige Konzentrationsentwicklung. An der Basis eines Zyklus liegen hohe Gehalte dieser Elemente vor. Diese belegen verdünnende marine und kontinentale Zuflüssen mit gelöster oder detritischer Fracht. Zum Hangenden nehmen die Konzentrationen ab. Mg und Mn zeigen den gleichen Trend, Ca, SO₃ und z. T. Sr einen entgegengesetzten Trend. Im Zyklus 7 deuten die Konzentrationen zwei diesem Trend entsprechende Kleinzyklen an. Diese Konzentrationsänderungen hin zu überwiegend hohen Gehalten an salinaren Elementen am Top der Zyklen korrelieren demzufolge sehr gut mit den ausgehaltenen Zyklen, die somit auch als „brining-upward“-Zyklen (KENDALL 1992), Zyklen mit nach oben zunehmender Salinität gedeutet werden können.

Zyklus 8 lässt keine signifikante geochemische Charakteristik erkennen. Ein Grund liegt in der z.T. geringen Probendichte. Auffällig sind bei 600,05 m (Probe RL113) extrem hohe Werte an Ba, Sr und Zr, eine Bindung dieser Elemente an Coelestin wird angenommen. Im darüber folgenden Bereich nehmen sowohl die an die Sulphatphase gebundenen Gehalte (SO₃, Sr, Zr) als auch die terrigenen kontinuierlich ab, während die Konzentrationen an Mg und Mn zunehmen. Oberhalb einer Teufe von 598,50 m macht sich eine Änderung des Chemismus bemerkbar, der zum Zyklus 9, der Diemel-Formation überleitet. Somit wird die Grenze Zyklus 8/Zyklus 9 durch den Chemismus nur ungenau abgebildet. Charakteristisch sind für diesen Bereich deutlich höhere Mg- und Mn-Gehalte, geringere Ca- und Sr-Gehalte. Die Elemente der terrigenen Phase sind gegenüber den unterlagernden Schichten leicht erhöht – Ausdruck eines ruhigen Sedimentationsmilieus.

Die Diemel-Formation (Zyklus 9) lässt im Chemismus eine deutliche Zweiteilung erkennen, die an der Basis durch steigende Gehalte an Mn und den terrigenen Elementen sowie durch abnehmende Gehalte der Elemente Ca, Mg und Sr charakterisiert wird. Diese Elementverteilungen kennzeichnen diese Schichtenfolge als Ablagerungen eines lagunären Stillwasserbereichs. Der obere Abschnitt zeigt eine zur Basis gegenläufige Tendenz, die auf eine zunehmende Wasserenergie zurückgeführt wird. Lediglich der Mn-Gehalt weist in den obersten zwei Metern wiederum leicht steigende Werte auf. Gegenüber der Basis des Mittleren Muschelkalks sind die Mn-Werte leicht erhöht, Ausdruck einer Vertiefung des Sedimentationsraumes sowie einer Zunahme des terrigenen Materials. Ca. 1 m unter der Grenze zum Oberen Muschelkalk nimmt der Mg-Gehalt bei steigenden Ca-Konzentrationen deutlich ab. Ein Ca/Mg-Verhältnis von ca. 4 wird als Hinweis auf Calcitvorkommen gesehen und ist somit Ausdruck einer geringeren salinaren Beeinflussung dieser Schichten (Abb. 29). Der Dolomit-Chemismus zeigt ebenfalls deutliche Veränderungen. Während für die unterlagernden Schichten ein nahezu stöchiometrischer Dolomit charakteristisch ist, dominieren in den obersten Metern des Mittleren Muschelkalks spätdiagenetische Ca-Dolomite mit CaCO₃-Gehalten von 51 - 55 mol%. Auffällig ist weiterhin eine Zn-Anomalie (Probe RL159), die auf feinverteilte Zinkblende, die jedoch röntgenographisch nicht nachgewiesen werden konnte, zurückgeführt wird. DE BOORDER et al. (1985) nehmen für den lagunären Muschelkalk der östlichen Niederlande eine initiale Metallkonzentration des höheren Inter- bis Supratidals an. Im Allgemeinen werden primäre Ausfällungen u. a. von Zinkblende in hypersalinaren, schlecht durchlüfteten Faziesbereichen begünstigt. Nach RÖHL (1988) sind Pb-Zn-Vorkommen im Zechstein und in der Trias des Mitteleuropäischen Beckens an Beckenränder und dort an die ersten Transgressionen gebunden. Für die erkannte Zn-Anomalie sowie eine Pb-Anomalie bei 587,83 m (Probe RL138) wird ein solcher Zusammenhang ebenfalls angenommen.

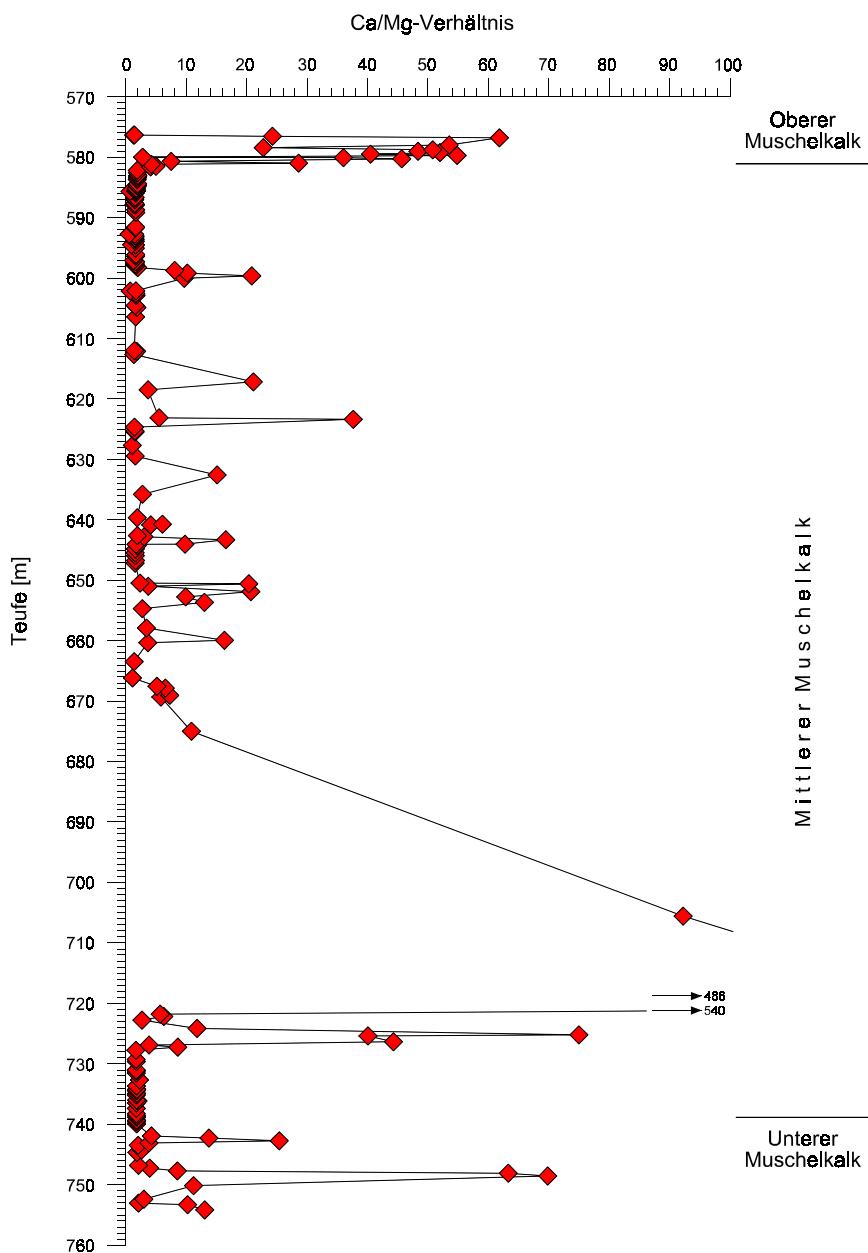


Abb. 29: Das Ca/Mg-Verhältnis in den untersuchten Sedimenten

5.7.6.3 Grenze Mittlerer/Oberer Muschelkalk

An der Grenze zum Oberen Muschelkalk ist ein sprunghafter Abfall der Mg-Konzentrationen bei nur langsam steigenden Ca-Gehalten zu beobachten, so dass das Ca/Mg-Verhältnis markant ansteigt. Typisch ist ein Quotient >5 , der innerhalb der Trochitenkalk-Formation weiter zunimmt (max. 61) und somit eine relativ niedrige Salinität belegt (Abb. 29). Die Calcite der Trochitenkalk-Formation sind spätdiagenetisch dolomitisiert. Der CaCO_3 -Gehalt der Dolomite beträgt 55 - 56 mol%. Während an der Basis des Oberen Muschelkalks die terrigenen Elementkonzentrationen teilweise nur geringfügig abnehmen, kann oberhalb der basalen Knauerkalke eine z. T. recht deutliche Abnahme beobachtet werden, die auf eine zunehmende Wasserbewegung zurückgeführt wird. Die Mn-Gehalte sind an der Grenze Mittlerer/Oberer Muschelkalk leicht erniedrigt, zeigen jedoch zum Hangenden generell eine leichte Zunahme. Die allgemein geringen Werte in der Trochitenkalk-Formation (250 - 350 ppm) wer-

den als Hinweis auf eine Schwellenposition des Profils zu dieser Zeit verstanden. Das Element Sr ist zur Grenzziehung nicht geeignet, die im oberen Abschnitt des Zyklus 9 begonnene steigende Tendenz setzt sich über die Grenze hinweg fort. Ab ca. 579,5 m ist eine leichte Abnahme der Sr-Gehalte zu verzeichnen. Die gegenüber dem Mittleren Muschelkalk höheren Sr-Werte werden auf eine bevorzugte Bindung von Sr im Calcit sowie Anhydrit/Gips zurückgeführt. Spuren von Anhydrit/Gips konnten in dieser Schichtenfolge in geringen Mengen nachgewiesen werden.

5.8 Faziesinterpretation und Ablagerungsräume

Als Ablagerungsraum des Mittleren Muschelkalks wird eine epeirische Karbonatplattform angenommen. Diese Plattformen werden als allgemein stabile tektonische Einheiten angesehen. Sie sind meist sehr flach mit einer vernächlässigbaren Topographie und werden durch bedeutende Ausdehnungen (100 bis 10 000 km) charakterisiert (TUCKER & WRIGHT 1990).

Die karbonat- und sulfatdominierten Gesteine des Mittleren Muschelkalks werden dem inter- bis supratidalen Faziesbereich zugeordnet, lediglich im Bereich der Übergänge zu Unterem und Oberen Muschelkalk herrschen subtidale Ablagerungsbedingungen vor.

Der Mittlere Muschelkalk wird durch zwei Sedimentationsphasen charakterisiert: einer regressiven Phase unten (Zyklen 1 - 4) und einer transgressiven Phase oben (Zyklen 5 - 9). Diese setzen sich aus einer Vielzahl regressiver Verflachungs-Zyklen („shallowing-upward“) zusammen. Das Flacherwerden gegen oben ist dadurch bedingt, dass die Sedimentationsraten der marinen Evaporite deutlich höher sind als die Subsidenzraten. Zusätzlich kommt das verdunstungsbedingte Absinken des Wasserspiegels (evaporitic drawdown) dieser Tendenz noch entgegen.

Im obersten Teil des Unteren Muschelkalks (Jena-Formation) sind die Karbonate durch eine spät-diagenetische Überprägung z. T. vollständig dolomitisiert. Die Peloidkalke der Oberen Schaumkalkbank repräsentieren den lagunären Faziesbereich im Grenzbereich Inter-/Subtidal. Annähernd isochron vollzieht sich an der Basis des Mittleren Muschelkalks mit dem Wechsel von calcitischer zu dolomitischer Fazies der fazielle Umschwung von subtidalen zu intertidalen Ablagerungsbedingungen. Alle Karbonate liegen nunmehr als Dolomit vor. Dieser fazielle Umschwung spiegelt sich auch in der Stöchiometrie der Dolomite wider. Während in den subtidalen Ablagerungen der Jena-Formation die spät-diagenetisch gebildeten Dolomite CaCO_3 -Gehalte von 51 - 56 mol % aufweisen, sind für die evaporitischen, synsedimentär bis frühdiagenetisch entstandenen Dolomite des Mittleren Muschelkalks CaCO_3 -Gehalte von 48 - 51 mol % charakteristisch (Abb. 23).

An der Basis des Zyklus 1 dominieren hypersalinare Faziesbedingungen in einem lagunären Milieu mit eingeschränkter Wasserzirkulation. Die Schichtung zeigt meist eine feine Lamination, was auf eine geringe Wasserbewegung hindeutet. Während der Sedimentation kam es immer wieder zu wahrscheinlich kurzzeitigen Phasen (Sturmereignisse) stärkerer Wasserbewegung, mergeligen Dolomiten sind Lagen von schill- und peloidführenden Dolomiten zwischengeschaltet. Im Zyklus 1 markiert das Auftreten von Algenlaminiten, feinlaminierter Dolomikrit mit intraformationellen Konglomeraten und Sulfatknoellchen und -lagen, die als Ablagerungen des tiefen Inter- bis Supratidals angesehen werden, eine weitere Abnahme der Wassertiefe sowie das Voranschreiten der progressiven Salinitätsentwicklung. Das Verschwinden der Fauna sowie die deutliche Zunahme des Sulfatanteils deuten ebenfalls darauf hin. Knollig ausgebildeter Maschendraht-Anhydrit („chicken-wire“-) tritt im obersten Bereich des Zyklus auf. Obwohl knollige Strukturen nicht immer auf Emersion schließen lassen, wird hier aufgrund der assoziierten Dolomit-Lithologien angenommen, dass es sich um diagenetische Bildungen in einem zumindest zeitweiligen Sabkha-Milieu handelt.

Der Zyklus 2 ist faziell durch das Auftreten von Dolomitmergelstein und Anhydrit gekennzeichnet. Bituminöse Sedimente sind charakteristisch für progressive Eindampfungsabschnitte von Evaporiten.

Während Anhydrit im Zyklus 1 meist in Form von mm- bis cm- großen Anhydritknoten auftritt und als diagenetische Bildung – Verdrängung von Dolomit durch CaSO_4 – gedeutet wird, finden sich nun sedimentäre, subaquatisch gebildete Dolomit-Anhydrit-Laminite, die infolge instabiler, häufig wechselnder Salinitätsbedingungen zur Ablagerung kamen. Eine weitere progressive Salinitätsentwicklung verbunden mit stabilen höher salinaren Bedingungen belegen massive Anhydrite im obersten Bereich des Zyklus 2.

In den Zyklen 3 und 4 kommt es zur Ablagerung mächtiger Steinsalzlager. Jedoch führen marine Zuflüsse an der Basis dieser beiden Zyklen zunächst zur Ablagerung von Dolomitmergelsteinen und Anhydriten (Zyklus 3) bzw. von Anhydriten (Zyklus 4).

Die Evaporite des Mittleren Muschelkalks können als „saltern evaporites“ angesprochen werden. WARREN (1989) bezeichnet als „saltern evaporites“ weitverbreitete flache-subaquatische Evaporite, die sich über hunderte von Kilometern ausbreiten können und sowohl auf Plattformen als auch in Sedimentbecken auftreten.

Die einzelnen Steinsalzlager sind aus zyklischen Sedimentationsprozessen mit deutlichem Verflachungs-Trend hervorgegangen. Die Salze wurden zu Beginn in einem relativ tiefen Becken abgelagert, das dann aber schnell mit Salz gefüllt wurde, so dass sich flachmarine Sedimentationsbedingungen einstellen konnten. Subaerische Einflüsse, z. B. kreuzgeschichteten Siltlagen und rote Mergel (WIDMER 1991), konnten im Salz der Bohrung Remlingen 7 nicht nachgewiesen werden. Durch den Einfluss frischen Meerwassers bildeten sich in den Steinsalzhorizonten anhydritische Zwischenlagen; es entstand stärker verunreinigtes Salz. Die Salinitäten innerhalb der Zyklen 3 und 4 blieben stets im Bereich Sulfat/Chlorid-Ausfällung. Hinweise auf insgesamt frühe Halitbildung innerhalb der salinaren Abscheidungsfolge geben u. a. die ermittelten niedrigen Bromgehalte der Salze (11 - 125 ppm), wobei der Bromgehalt von 11 ppm eine Umkristallisation des Salzes belegt. Ein gut entwickeltes Bromprofil mit steigenden Bromgehalten bei zunehmender Salinität fehlt, so dass die Salze als Bildungen einer weitläufigen, flachen Plattform angesehen werden.

Der im Zyklus 3 der Bohrung Remlingen 7 auftretende brekzierte Anhydrit wird als laterales Äquivalent von Salzablagerungen des Zyklus 3 des Bec??kenzentrums angesehen. Seine Entstehung wird auf laterale Lösungsvorgänge der Salzhorizonte zurückgeführt. Dies impliziert, dass ursprünglich deutlich mehr Salz abgelagert worden war. Untersuchungen von ANDERSON et al. (1978) an Evaporiten des Delaware Basin haben gezeigt, dass 0,3 m einer Anhydrit-Brekzie ungefähr 6 - 9 m Halit entsprechen. Demnach entspricht die ca. 1,5 m mächtige Anhydritbrekzie einem 30 - 45 m mächtigen Salzhorizont.

Mit dem Zyklus 5 endet in der Bohrung Remlingen 7 die Zeit maximaler Evaporitentwicklung mit Steinsalzbildung. Es beginnt die rezessive Konzentrationsentwicklung innerhalb des salinaren Großzyklus, in deren Folge wieder Dolomite abgelagert werden. Die im Zyklus vorkommenden roten Salze sind sekundäre Füllungen von störungsbedingten Klüften. Darüber auftretende Brekzien werden als synsedimentäre Ablaugungsscheinungen gedeutet. Es wird angenommen, dass in diesen Bereich ursprünglich noch Salz zur Ablagerung gekommen ist, das aber frühzeitig wieder abgelaugt wurde ist, denn im obersten Abschnitt des Zyklus 5 kommt es zu einer deutlichen Erniedrigung der Salinität.

Dieser dolomitbetonte Abschnitt korreliert mit dem Mittleren Dolomit nach SEIDEL (1965) (DII nach SCHULZE 1964). Seine Ablagerung wird mit ersten Zuflüssen aus SW über die „Westliche Pforte“ in Zusammenhang gebracht (KOZUR 1974).

In den Zyklen 6 bis 8 dominieren wechselnde Salinitäten im Bereich von Dolomit- und Sulfatausfällung. Dabei lassen sich Konzentrationserhöhungen zum Hangenden der einzelnen Zyklen hin beobachten. Dolomit-Anhydrit-Laminite werden analog den Ablagerungen des Zyklus 2 als subaquatische Ablagerungen angesehen. Darauf deuten u. a. wellige Laminationen und flache Rippeln hin. Ein schrittweiser Rückgang der anhydritischen Fazies zugunsten der dolomitischen wird beobachtet, wo-

bei die Dolomite inter- bis supratidale Ablagerungsbedingungen repräsentieren. Indizien dafür sind Algenlaminate, feine Laminationen ohne Bioturbation und intraformationelle Konglomerate. Der höhere Teil des Zyklus 8 wird durch das letztmalige Auftreten von sedimentärem, subaquatisch gebildetem Anhydrit in geringmächtigen Lagen charakterisiert.

Eine rein karbonatische Fazies prägt das Bild des Zyklus 9. Im oberen Abschnitt dieses Zyklus vollzieht sich der Übergang von dolomitisch-hypersaliner zu calcitisch-„normal“-mariner Fazies. Damit verbunden ist eine zunehmend unvollständigere Dolomitisierung, die sich zeitlich in Richtung Spätdiagenese verschiebt.

Die Ablagerungen des Zyklus 9 bestehen aus massigen Dolomikritten, laminierten Dolomitmergeln und dolomitischen Mergeln mit einer ausgeprägten Feinlamination und werden einem inter- bis subtidalen, hypersalinar-lagunären Faziesbereich zugeordnet. Regressive Verflachungszyklen-Zyklen sind typisch. Im unteren Abschnitt ist ein gehäuftes Auftreten von Intraklast- sowie Siltsteinlagen mit Bonedbed-Charakter auffällig, was auf Phasen mit z. T. starker Wasserbewegung im sonst doch allgemein niedrig-energetischen Milieu hindeutet. Auch im oberen Abschnitt treten periodisch Schill- und oolithische Horizonte in den sonst mikritischen Karbonaten auf. Generell sind die Ablagerungen des Zyklus 9 einem lagunären Stillwasserbereich zuzuordnen, in dem gelegentlich auch stärkere Wasserbewegungen auftraten.

Nach den palynologischen Bestimmungen (HEUNISCH 1997, 1998) belegt das Pollenspektrum einen Süß- und Brackwassereinfluss im unteren Abschnitt des Zyklus 9. Das Einsetzen von Acritarchen in den obersten Zentimetern des Zyklus 9 zeigt den Umschwung zu marinen subtidalen Ablagerungsbedingungen an.

Mit der Fortsetzung der transgressiven Tendenz stellen sich im Trochitenkalk wieder vollmarine Bildungsbedingungen ein. Die bioklast- und ooidreichen massigen Kalke des Trochitenkalks werden dem subtidalen Faziesbereich zugeordnet, wobei Oolithe im allgemeinen in Zonen geringer Wassertiefe zu finden sind. RÖHL (1988) ordnet diese Ablagerungen Schwellen- und Schwellenflanken zu. Nach GROETZNER (1962) existierte im Bereich des Elms ein Untiefenbereich. Die Sedimentation erfolgt zyklisch mit einem Flacherwerden nach oben.

6 DER MITTLERE MUSCHELKALK IN DEN BOHRUNGEN NORDDEUTSCHLANDS

Nachdem in der Bohrung Remlingen 7 anhand der Bohrkernuntersuchungen eine detaillierte Zyklische Gliederung erarbeitet werden konnte, wurde in einem weiteren Schritt eine regionale lithostratigraphische Analyse des Mittleren Muschelkalks für das gesamte Norddeutsche Becken durchgeführt. Ziel war es, die Beckenentwicklung des Norddeutschen Beckens zu dieser Zeit zu klären. Hierbei sollte insbesondere die Bedeutung differenzierter Subsidenz und/oder synsedimentärer Tektonik auf den Sedimentationsablauf im Mittleren Muschelkalk geklärt werden. Dies konnte jedoch erst geschehen, nachdem eine im gesamten Becken anwendbare, möglichst detaillierte Feingliederung existierte. Denn nur durch die regionale Korrelation möglichst kleiner Teileinheiten einer Schichtenfolge bzw. Formation sind gesicherte Rückschlüsse auf die paläogeographisch-paläotektonische Entwicklung eines Sedimentbeckens möglich. Zudem lassen sich so tektonische Bewegungen sowie das unterschiedliche Subsidenzverhalten einzelner Strukturelemente zeitlich exakter fassen.

Eine solche, lithologisch, mikrofaziell und auch geochemisch begründete Feingliederung konnte wie bereits oben beschrieben in der Bohrung Remlingen 7 erarbeitet werden. Danach wurden die so definierten Unter- und Obergrenzen der einzelnen Zyklen auf die geophysikalischen Bohrlochmessungen dieser Bohrung übertragen. Wie sich zeigte, weisen die verschiedenen Zyklen vor allem in der Logkombination von Gamma-Ray- und Sonic-Log ganz charakteristische Logbilder auf (Kap. 5.4). In einem weiteren Schritt war diese Gliederung auf die übrigen Bohrungen des Norddeutschen Beckens zu übertragen, denn nur mit Hilfe der geophysikalischen Bohrlochmessungen ist eine breitweite lithostratigraphische Analyse der Schichtenfolge möglich, da nur von wenigen und vereinzelt stehenden Bohrungen Kernmaterial zur Verfügung steht (Kap. 7.4).

Das Ergebnis der regionalen lithostratigraphischen Analyse des Mittleren Muschelkalks in Norddeutschland wird anhand von Typusprofilen und regionalen Korrelationsketten erläutert.

6.1 Regionalgeologische Gliederung des mitteltriassischen Norddeutschen Beckens

Das Norddeutsche Becken war zur Zeit der Trias ein Gebiet differenzierter, sowohl epirogener als auch taphrogenen Absenkung. Es ist in sich stark in Schwellen, Senkungszonen sowie auch Gräben und Horste gegliedert. Neben den großräumig angelegten epirogenen Strukturelementen wie Schwellen- und Senkungszonen beeinflussen - wie Untersuchungen in der tieferen und oberen Trias gezeigt haben - auch syngenetisch aktive Störungszonen den differenzierten Subsidenzprozess und damit die Mächtigkeits- und Faziesverteilung sowie den stratigraphischen Umfang der einzelnen Schichtenfolgen. Daher war u. a. bei der Auswahl der regionalen Typusprofile sowie der Korrelationsketten für den Mittleren Muschelkalk darauf zu achten, dass neben den verschiedenen Fazieszonen die wichtigsten strukturellen Großeinheiten berücksichtigt wurden.

Das im Prä-Zechstein angelegte Störungsmuster gliedert das Norddeutsche Becken intensiv in Teilschollen. Dieses in Abb. 33 dargestellte großräumige Schollenmuster pauste sich mehr oder weniger deutlich auch während der nachfolgenden Zeiten durch. Für die regionalgeologische Gliederung des Beckens zur Zeit des Muschelkalks wird auf die heutige strukturelle Nomenklatur zurückgegriffen, wie sie von BALDSCHUHN & KOCKEL (1997) im Rahmen der Arbeiten am „Geotektonischen Atlas von Nordwestdeutschland“ entwickelt worden ist. Die gebräuchlichen strukturellen Begriffe werden dabei aus dem heutigen Strukturbild abgeleitet, das sich in dieser Form erst mit der santonen Inversionsphase des Beckens herausbildete.

Folgende regionalgeologische Großeinheiten (Abb. 30) werden ausgeschieden:

- **Westliches Norddeutsches Becken**
- **Zentrales Norddeutsches Becken**
- **Östliches Norddeutsches Becken**
- **Nördliches Norddeutsches Becken**

Diese regionalgeologischen Großeinheiten werden unter Berücksichtigung der lithologischen und faziellen Entwicklung des Mittleren Muschelkalkes weiter in Regionen unterschieden (Abb. 30). Danach gliedert sich das **Westliche Norddeutsche Becken** in

- die **Ostfriesland-Region**, die im Westen in etwa von der Niederländischen Schwelle und im Osten vom mittleren Abschnitt des Emtinghausen-Krautsand-Lineaments begrenzt wird. Die südliche Begrenzung folgt in etwa dem Leer-Bremen-Lineament, die nördliche der Wangerooge-Midlum-Störungszone.
- Die **Ostfriesland-Region – Norderney-Westdorf-Scholle**, die im Westen von der Siegelsum-Norderney-Manuela-Störungszone und im Osten von der Bedekaspel-Marga-Johanna-Störungszone begrenzt wird. Diese Region umfasst die Sonderentwicklung des Mittleren Muschelkalkes im Bereich des muschelkalkzeitlichen „Westdorf-Grabens“.
- Die **südliche Weser-Ems-Region** umfasst den Bereich zwischen Niederländischer Schwelle im Westen und der Bad Meinberg-Egge-Störungszone im Osten. Den südlichen Abschluss findet diese Region in der Weerselo- und Gronau-Waldhügel-Störungszone sowie dem östlich daran anschließenden Osning-Lineament.

Das **Zentrale Norddeutsche Becken** besteht ebenfalls aus mehreren (Teil-)Regionen:

- Die **westliche Weser-Elbe-Region**. Diese Region liegt östlich des Emtinghausen-Krautsand-Lineaments und reicht nach Osten bis etwa an den Westrand der Braunschweig-Gifhorn-Bruchzone (Broistedt-Wittingen-Störungszone). Während sie im Norden durch das Uelzen-Lineament begrenzt wird, reicht sie nach Süden bis an den Südrand der Hannover-Scholle (im Westen) bzw. der Hildesheim-Scholle (im Osten).
- Die **östliche Weser-Elbe-Region** hat ihre süd- und südöstliche Begrenzung im Uelzen-Lineament, der Broistedt-Wittingen-Störungszone sowie dem Allertal-Lineament. Der Nordteil dieser Region umfasst die Nordaltmark-, die Lauenburg-Bleckede-, die Wendland-, die Horndorf-, die Lüneburg- und die Ramelsloh-Witzhave-Scholle.
- Die **südliche Weser-Elbe-Region** umfasst den Bereich südlich der Hannover- und der Hildesheim-Scholle. Hier wird der Westrand von der Bad Meinberg-Egge-Störungszone und der Bad Nenn-dorf-Störung gebildet, der Ostrand vom Leinetalgraben.
- Die **Subherzyn-Region** wird für den Mittleren Muschelkalk durch das Referenzprofil der Bohrung Remlingen 7 repräsentiert und umfasst einen Bereich östlich der Hildesheim-Scholle (Ost) zwischen dem Harz-Nordrand-Lineament im Süden und dem Allertal-Lineament im Norden.

Das **Östliche Norddeutsche Becken**, im Westen begrenzt durch das Rheinsberg-Lineament, wird für den Mittleren Muschelkalk nicht weiter in Teilschollen untergliedert. Diesem Beckenbereich gehören u. a. die Brandenburg-, die Ostbrandenburg-, die Buchholz-, die Niederlausitz-, die Mittenwalde- sowie die Frankfurt (Oder)-Scholle an.

Unter dem Begriff **Nördliches Norddeutsches Becken** wird die gesamte zentrale Beckenachse zusammengefasst. Sie umfasst strukturgeologisch das Gebiet vom Horn-Graben über den östlich daran anschließenden Westschleswig-Block, den strukturell stark gegliederten Glückstadt-Graben und den Ostholstein-Westmecklenburg-Block bis zum Rheinsberg-Lineament im Osten.

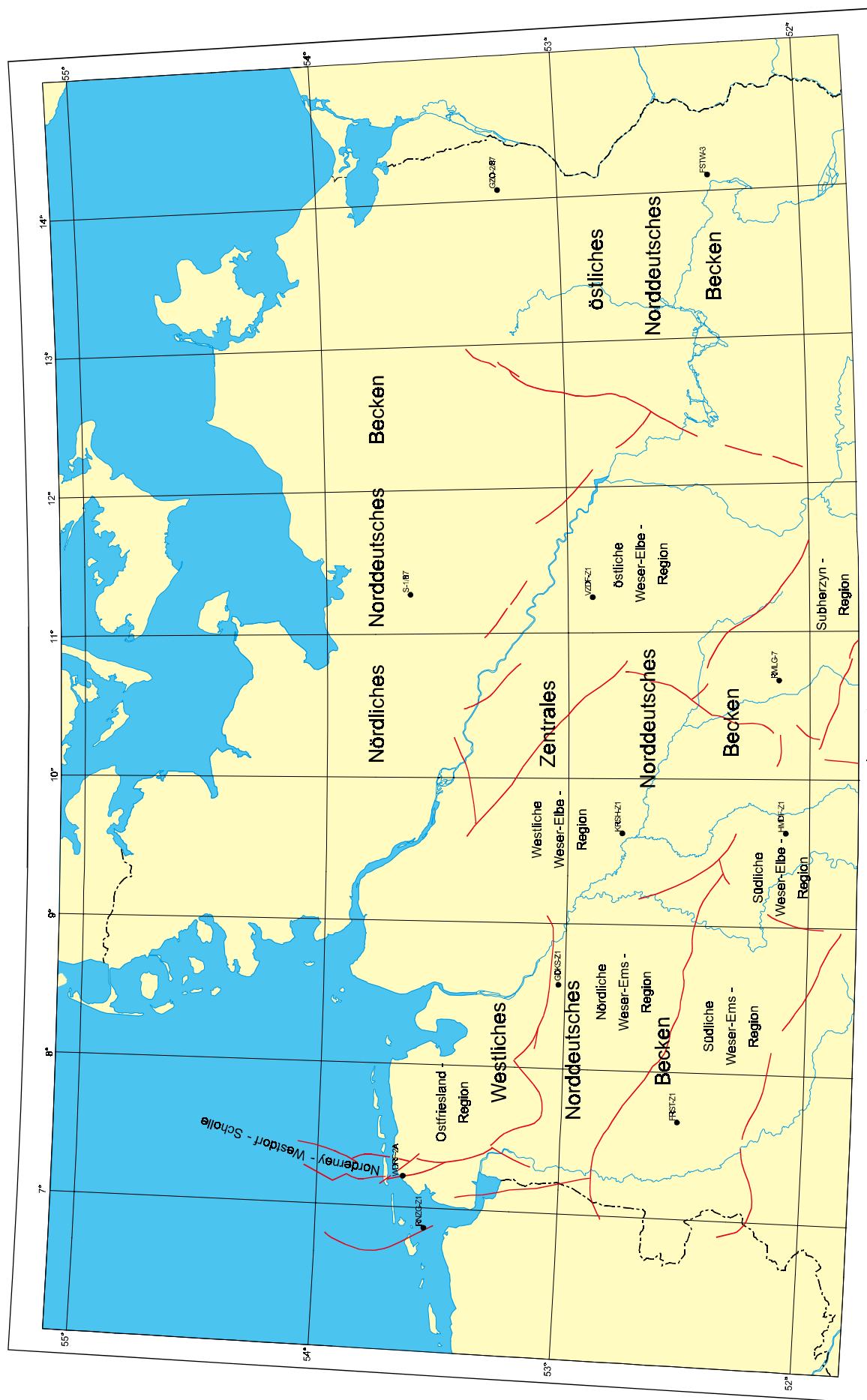


Abb. 29: Regionalgeologische Einheiten des Norddeutschen Beckens unter Berücksichtigung der lithologischen und faziellen Entwicklung des Mittleren Muschelkalks

Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass epirogenen Bewegungen, die zur Ausbildung der zuvor erwähnten Schwellen- und Senkungszonen geführt haben, bereits während des höheren Zechsteins wesentlichen Einfluss auf die Fazies- und Mächtigkeitsverteilung hatten, insbesondere des Schichtabschnittes von der Ohre- bis zur Mölln-Folge (BEST 1986, 1988, 1989, GELUK 1999). Während des Buntsandsteins erreichten dann auch taphrogenetische Bewegungen einen ersten Höhepunkt (RÖHLING 1986, 1988, 1991, GELUK & RÖHLING 1997, 1999). So bildete sich im Bereich der Eichsfeld-Altmark-Schwelle eine relativ schmale, absätzige, störungsbegrenzte Horstzone heraus, deren Scheitelbereich sich später – im Keuper – durch weitere Bewegungsumkehr in eine Grabenstruktur umwandelte. Daneben kam es zur Anlage von Gräben und Halbgräben (u. a. Horn-, Glückstadt-Graben).

Hinweise auf tektonische Bewegungen während der mittleren Trias bzw. des Muschelkalks gaben erstmals BEST, BRÜCKNER-RÖHLING & RÖHLING (1993) sowie GAERTNER & RÖHLING (1993). Während der Oberen Trias erreichten die tektonischen Bewegungen dann ihren zweiten und größten Einfluss (u. a. FRISCH & KOCKEL 1998, 1999, BEUTLER 1995a, b).

Zu den groß angelegten epirogenen, die Fazies- und Mächtigkeitsentwicklung beeinflussenden Grundelementen des Norddeutschen Beckens zählen vor allem die am Südrand des zentralen Norddeutschen Beckens gelegenen, überwiegend NNE-SSW streichenden Schwellen und Senken (von West nach Ost) (Abb. 31):

- **Niederländische-Schwelle**
- **Ems-Senke**
- **Hunte-Schwelle**
- **Weser-Elbe-Hoch**
- **Weser-Senke**
- **Eichsfeld-Altmark-Schwelle (= Braunschweig-Gifhorn-Bruchzone)**
- **Thüringisch-Westbrandenburg-Senke**
- **Ostbrandenburg-Oder-Schwelle**

Nördlich dieser NNE-SSW streichenden Strukturelemente schließt sich ein Bereich an, der im Mittleren Muschelkalk – im Gegensatz zum Mittleren Buntsandstein – durch ein deutlich ruhigeres paläogeographisches Bild charakterisiert wird. Dennoch lassen sich auch hier, u. a. anhand der in den reflexionsseismischen Messungen deutlich werdenden Mächtigkeitsdifferenzierungen, groß angelegte, z. T. ebenfalls NNE-SSW streichende, taphro- und epirogenen Strukturelemente erkennen, die eine regionale Untergliederung der WNW-ESE streichenden zentralen Beckenachse erlauben. Danach lassen sich von West nach Ost unterscheiden:

- **Horn-Graben** und die südliche Verlängerung in die **Ems-Senke**
- **Helgoland-Becken**
- **Glückstadt-Graben** und die südliche Verlängerung in den **Bremen-Graben**
- **Holstein-Mecklenburg-Senke**

Die Borkum-Schwelle, die vor allem im Mittleren Buntsandstein das Helgoland-Bec??ken in ein westliches und ein östliches Teilbecken untergliederte, existiert zur Zeit des Muschelkalks nicht bzw. ist bisher nicht nachweisbar. Den Nordrand des Norddeutschen Beckens bildet das WNW-ESE-streichende Ringköbing-Fünen-Hoch mit der im Osten anschließenden Rügen-Schwelle.

Neben den großräumigen Strukturelementen beeinflussen taphrogene sowie socketinduzierte halo-kinetische Bewegungen die lithologische und fazielle Ausbildung und die Mächtigkeitsentwicklung der verschiedenen Schichteinheiten des Mittleren Muschelkalks. Diese Bewegungen ließen sich aus den Mächtigkeitsunterschieden des Schichtpaketes Röt/Muschelkalk, die aus geologischen Schnitten

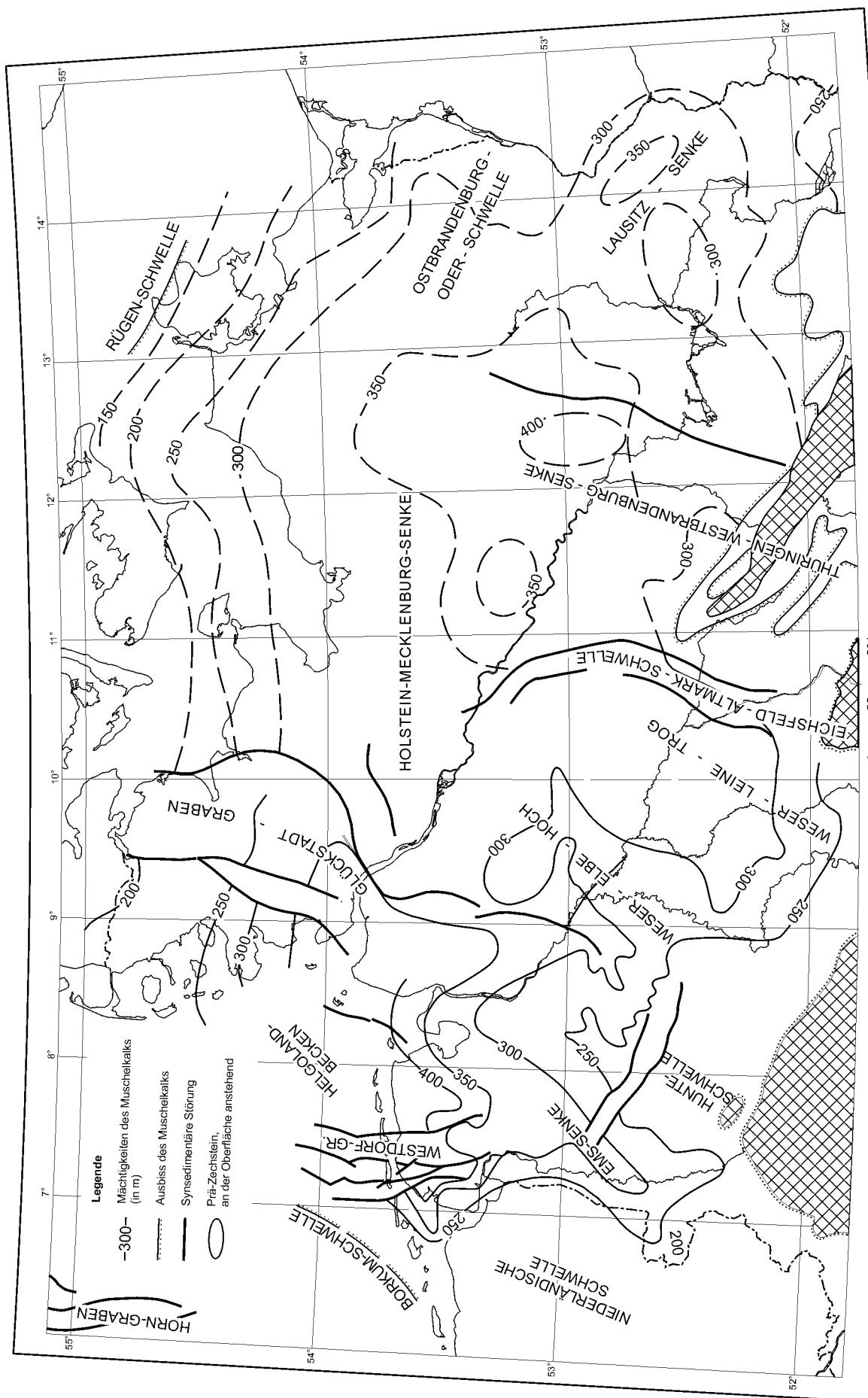


Abb. 31: Paläogeographische Rekonstruktion des Muschelkalks im Norddeutschen Becken, verändert nach BEUTLER (1993) und GAERTNER (1993)

(BALDSCHUHN et al. 1996, KOCKEL 1995) abgelesen wurden, ableiten. Dabei ist es nicht in allen Fällen möglich, festzustellen, welcher Teil der synsedimentären Bewegungen auf den Röt-Zeit und welcher auf die Muschelkalk-Zeit anzurechnen ist.

Die im Mittleren Muschelkalk synsedimentär aktiven Störungen folgen, wie auch im Buntsandstein und im Keuper, einem alten, bereits spätvariszisch bzw. prä-zechsteinzeitlich angelegten System von Sockelstörungen. An nachstehenden Störungen im Oberbau konnten intraformationelle Bewegungen wahrscheinlich gemacht werden (BRÜCKNER-RÖHLING & KOCKEL 1999):

Im Bereich des Horngrabens

- am Weiße Bank-Escarpment im Strukturbereich Hille,
- an der Weiße Bank-Rampe im Strukturbereich Hermine,
- am Dorothea-Dorthe-Abbruch. Hier schwilzt der Komplex Röt/Muschelkalk von 500 m auf der W-Scholle auf ca. 3000 m auf der Grabenscholle im E an.

Im Bereich der Schollentreppe an der E-Flanke der Borkum-Schwelle

- an der Bedekaspel-Marga-Johanna-Störungszone, die die Westdorf-Scholle im E begrenzt. Diese Scholle fungiert für den Zeitabschnitt Röt-Muschelkalk als tief eingesenkter Graben. Der Schichtkomplex erreicht hier Mächtigkeiten bis 1100 m im Vergleich zu 600 m auf der W-Scholle.
- die Strackholt-Langeoog-Mira-Störungszone bewegte sich zur Röt-Muschelkalk-Zeit W-abschiebend, zumindest im Festlandbereich.

Im Bereich des Glückstadt-Grabens

- an der Flensburg-Störung W-abschiebend,
- an der Marne-Süderstapel-Störungszone im Bereich Hennstedt-Süderstapel W-abschiebend (400 m E, 700 m im W), im Bereich Süderhastedt E-abschiebend (400 m zu 650 m),
- an der Holnis-Störung E-abschiebend. Im Bereich Schleswig schwilzt das Röt-Muschelkalk-Band von 600 m im W an der Störung auf 2000 m an, bei Grevenhorst von 500 auf 1400 m.
- An der Mönkloh-Waabs-Störungszone im Bereich Honigsee, Warnau (700 m im W und 400 m im E) und Boostedt (600 m im W und 200 m im E),
- an der den Glückstadt-Graben querenden Rendsburg-Störungszone (3990 m im N, 1200 m im S),
- an der Elmshorn-Sievershütten-Störungszone bei Elmshorn (600 m im NW, 350 m im SE),
- an der Mellum-Scharhörn-Störungszone (350 m im W, 600 m im E).

Im Bereich des Ems-Linenaments

- bei Wybelsum (400 m im W, 700 m im E).

Im Bereich der Eichsfeld-Altmark-Schwelle

- zwischen Gülden-Braudel und Rosche-Thondorf dünnnt das Paket Röt-Muschelkalk auf Teilen des Buntsandsteinhorstes auf kurze Entfernung stark aus, ebenso zwischen Varbitz und Braudel (400 m gegenüber 600 m beiderseits des Zentralhorstes).
- Die Buntsandstein-Horstzone in der südlichen Verlängerung der Eichsfeld-Altmark-Schwelle zwischen Vorhop und Schneflingen-Ehra, Gifhorn und Calberlah, Gifhorn und Weyhausen, Bechtsbüttel und Lehre, Vechelde und Thiede, Neindorf und Salzdahlum zeigt auch für den Abschnitt Röt-Muschelkalk sehr geringe Mächtigkeiten im Vergleich zur Umgebung.

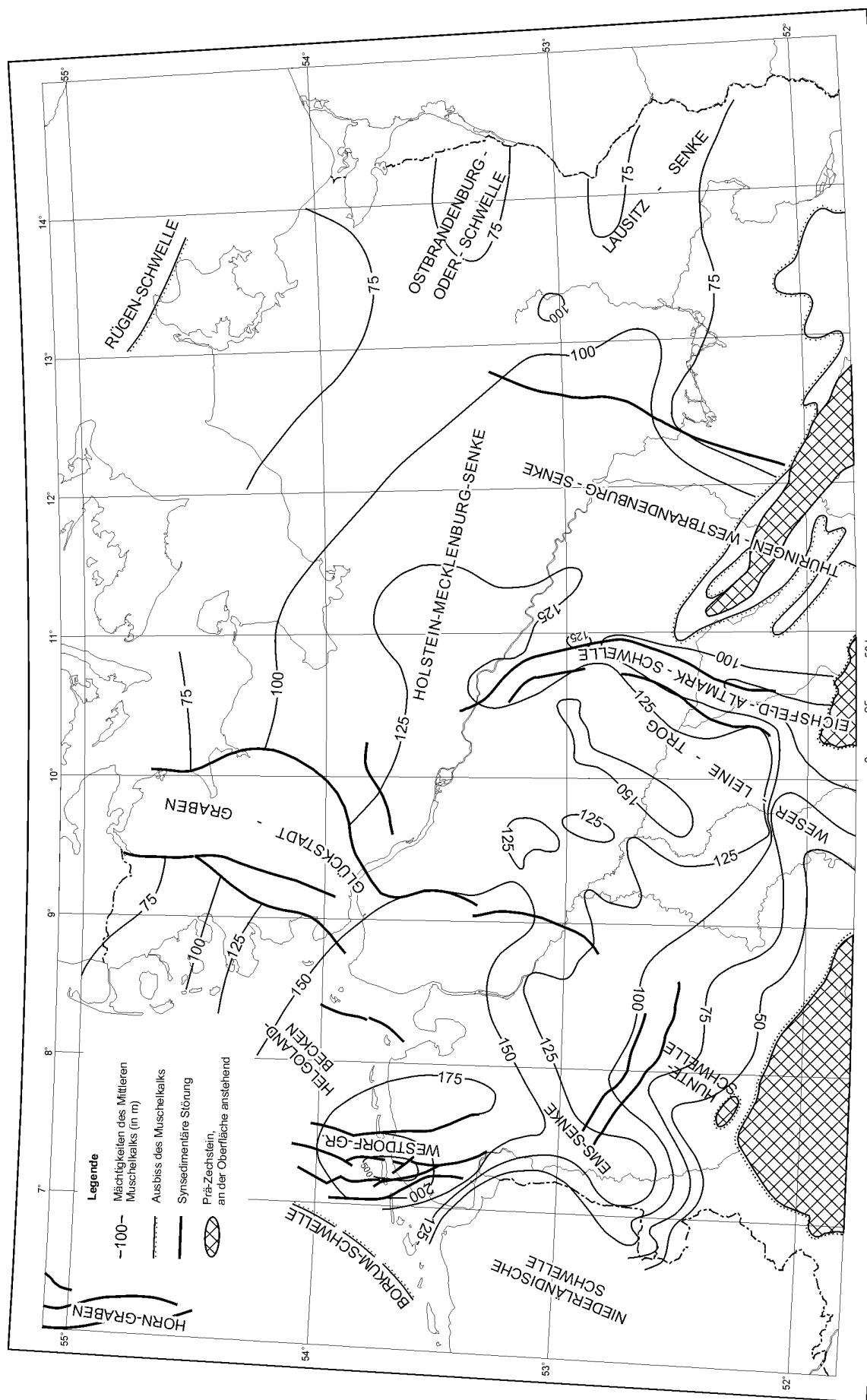


Abb. 32: Restmächtigkeiten des Mittleren Muschelkalks im Norddeutschen Becken, verändert und ergänzt nach GAERTNER & RÖHLING (1993)

Synsedimentäre Mächtigkeitsreduktionen sind auch im Bereich des Südniedersachsen-Lineaments zu erkennen, so z. B. über den Hochlagen des Mittleren Buntsandsteins auf der Sögel-Wachtum-Quakenbrück-Ortland-Scholle.

Die mitteltriassischen Bewegungen lassen sich nunmehr in ihrem Ein- und Aussetzen zeitlich exakt fassen sowie im Ausmaß quantifizieren. Die Hauptbewegungen an diesen Störungen erfolgten im Mittleren Muschelkalk. Von Bedeutung ist, dass die Ausbildung der einzelnen Salinare eng mit den Rift-Bewegungen verknüpft zu sein scheint (z. B. Westdorf-Scholle). Insgesamt jedoch sind die synsedimentären bruchtektonischen Bewegungen zur Zeit des Muschelkalks im Vergleich zu denen des Mittleren Buntsandsteins und des Keupers von geringerer Bedeutung. Dies bestätigen die überregionalen Logkorrelationen ebenso wie die Auswertungen reflexionsseismischer Messungen.

Aus den vorhandenen Mächtigkeitskarten sowie auch aus abgedeckten Karten einzelner triassischer Schichtenfolgen (RÖHLING 1991, GELUK & RÖHLING 1993, BALDSCHUHN et al. 1996, FRISCH & KOCKEL 1999) wird deutlich, dass für das Norddeutsche Becken zumindest für die Zeit der Trias ein relativ konstantes Block- bzw. Störungsmuster existierte. Dieses Blockmuster wird im wesentlichen von folgenden Richtungen bestimmt: WNW-ESE, NNE-SSW und NNW-SSE. Das in Abb. 33 dargestellte Sockelstörungsmuster wurde im Verlaufe des Mesozoikums wiederholt reaktiviert. Dabei lassen sich an den verschiedenen Störungen im Verlaufe der Zeit nicht nur unterschiedliche Intensitäten im Bewegungsmuster, sondern teilweise auch eine Bewegungsumkehr entlang einzelner Störungszonen nachweisen (KOCKEL 1999).

6.2 Unter- und Obergrenze des Mittleren Muschelkalks in geophysikalischen Bohrlochmessungen des Norddeutschen Beckens

6.2.1 Die Grenze Unterer/Mittlerer Muschelkalk

Der Untere Muschelkalk endet mit dem Bereich der Schaumkalkbänke. Dieser durch einzelne, mehr oder weniger mächtige Tonmergellagen unterbrochene Bereich ist aufgrund geringer Gammastrahlung sowie geringer Schall-Laufzeit in fast allen Bohrungen des Norddeutschen Beckens meist recht gut wiederzuerkennen und zu korrelieren. Als Grenze zum Mittleren Muschelkalk wird die Oberkante der Oberen Schaumkalkbank definiert (S. 27).

Der Mittlere Muschelkalk beginnt mit der Karlstadt-Formation, einer Abfolge, in der Dolomite und Dolomitmergel dominieren. Dieser markante lithologische Wechsel bzw. der deutliche Anstieg des Dolomitmergel-Gehaltes ist in den Kernbohrprofilen, den Spülproben und den geophysikalischen Bohrlochmessungen deutlich zu erkennen. Gegenüber den Karbonatbänken sind die Dolomitmergel durch eine deutlich höhere Gammastrahlung charakterisiert, d.h. die Grenze Unterer/Mittlerer Muschelkalk wird sowohl im Gamma-Ray- als auch im Sonic-Log in einen deutlichen Anstieg der Strahlung bzw. der Schall-Laufzeiten gelegt.

6.2.2 Die Grenze Mittlerer/Oberer Muschelkalk

Die Grenze zwischen Mittlerem und Oberem Muschelkalk ist durch einen markanten lithologischen Wechsel von den dolomitisch-mergeligen Schichten der Diemel-Formation zu den mehr oder weniger kompakten Kalksteinen der Trochitenkalk-Formation gekennzeichnet. Dieser spiegelt sich in den Gamma-Ray- und Sonic-Log-Messkurven in einem deutlichen Rückgang der Gammastrahlung bzw. in deutlich verringerten Schall-Laufzeiten wider und bildet im gesamten Norddeutschen Becken einen markanten Leit-Horizont.

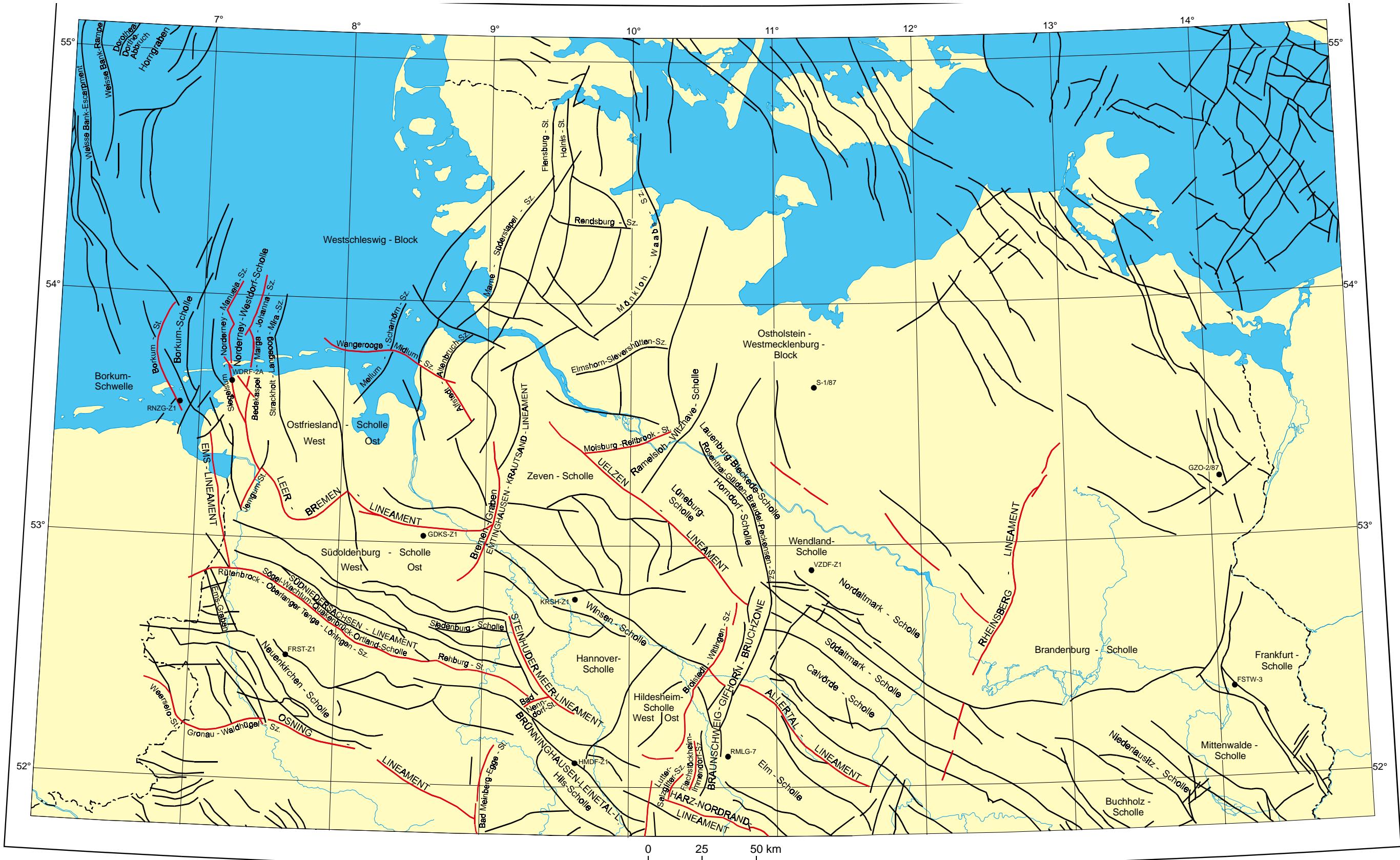


Abb. 33: Lage der Standardprofile des Mittleren Muschelkalks innerhalb des Sockelstörungsmusters von Norddeutschland (nach BALDSCHUHN & KOCKEL (1997), KRULL (unveröff.), Abkürzungen der Bohrungen siehe Tabelle 16

6.3 Regionale Korrelation der Zyklizität

Die in den Bohrkernen des Standardprofils Remlingen 7 definierten Zyklen spiegeln sich in den geophysikalischen Bohrlochmessungen (Gamma-Ray-, Sonic-Log) in charakteristischen Logbildern wider. Anhand der geophysikalischen Messkurven wurde dieser kleinzyklische Aufbau in benachbarten Bohrungen und nach Möglichkeit im gesamten Norddeutschen Becken verfolgt.

Insgesamt wurden mehr als 60 Bohrungen mit möglichst vollständigen und ungestörten Schichtabschnitten und geeigneten Logs aus einer Vielzahl von Bohrungen aller Struktureinheiten des Norddeutschen Beckens ausgewählt, detailliert gegliedert und miteinander korreliert. Die Korrelation der Bohrungen erfolgte dabei konventionell auf visuellem Wege. Wie sich bereits in anderen Untersuchungen zeigte (s.u.), erscheint ein quantitativer Vergleich absoluter Messwerte nicht sinnvoll, vielmehr ist im Logbild auf einen Wechsel zwischen relativ hohen und geringen Messwerten zu achten, sowie u. a. auch auf die Abfolge charakteristischer Logspitzen bzw. Logspitzengruppen. Über die Einbeziehung möglichst vieler Bohrungen sowie das Ringschlussverfahren lassen sich bei der regionalen Korrelation auch laterale Faziesänderungen anhand von schrittweisen Veränderungen in den Logkonfigurationen der einzelnen Zyklen erkennen und dokumentieren.

Dieses Verfahren hat sich in zahlreichen, in den letzten Jahren durchgeführten Regionalstudien in der Trias, im Perm und im Jura Norddeutschlands bewährt (u. a. BEUTLER 1995, BEST 1986, 1989, BRÜCKNER-RÖHLING & LANGBEIN 1993, DULCE et al. 1993, GAERTNER 1993, GAERTNER & RÖHLING 1993, GAST 1988, GRALLA 1988, GRAMANN et al. 1997, RÖHLING 1986, 1991a, b, 1993).

6.4 Die Standardprofile für den Mittleren Muschelkalk des Norddeutschen Beckens

Ausgehend vom Referenzprofil für den Mittleren Muschelkalk, der Bohrung Remlingen 7, wird im Folgenden die lithologisch-fazielle Ausbildung und Gliederung des Mittleren Muschelkalks beschrieben.

Wie bereits in Kap. 6.1 ausführlich dargestellt, ist das Norddeutsche Becken während der Trias durch synsedimentär aktive Sockelstörungen in eine Vielzahl von Teilschollen gegliedert. Bedeutende Lineamente innerhalb dieses Sockelstörungsmusters erlauben eine Gliederung des Beckens in größere Regionen (s. a. Kap. 6.1), in denen die lithologisch-fazielle Ausbildung und z. T. auch die Mächtigkeitssentwicklung des Mittleren Muschelkalks mehr oder weniger einheitlich ist. So stellt z. B. die Ostfriesland-Region das Hauptsubsidenzzentrum zur Zeit des Mittleren Muschelkalks dar, für die gut ausgebildete, mächtige Salinarzyklen mit insgesamt vier Steinsalzlagern typisch sind. Die innerhalb dieser Region gelegene Teilregion „Norderney-Westdorf-Scholle“ weist dagegen die mächtigste und vollständigste Salinarentwicklung auf. Hier sind 6 Steinsalzlager ausgebildet, während in der Südlichen Weser-Ems-Region sowie der Region Östliches Norddeutsches Becken die Salinarentwicklung nur bis zur Sulfatausscheidung reicht.

Im Folgenden werden für die verschiedenen Regionen repräsentative Standardprofile vorgestellt. Diese wurden so gewählt, dass sie anhand der Logausbildung die jeweils charakteristische lithologisch-fazielle Entwicklung des Mittleren Muschelkalks zeigen. Von den 10 ausgewählten Profilen repräsentiert das Referenzprofil Remlingen 7 die Elm-Scholle bzw. den zwischen Allertal-Lineament im Norden und dem Harz-Nordrand-Lineament gelegenen Teil der Eichsfeld-Altmark-Schwelle. Insgesamt wurden folgende Bohrungen als Standardprofile ausgewählt (Abb. 30, 33):

Bohrung:	Regionaltektonische Einheit:	Region:
Randzelgat Z1	Borkum-Scholle	Ostfriesland-Region
Westdorf 2A	Norderney-Westdorf-Scholle	Ostfriesland-Region – Teilregion Norderney-Westdorf-Scholle
Ganderkesee Z1	Südoldenburg-Scholle-Ost	Nördliche Weser-Ems-Region
Fürstenau Z1	Neuenkirchen-Scholle	Südliche Weser-Ems-Region
Krusenhausen Z1	Winsen-Scholle	Westliche Weser-Elbe-Region
Volzendorf Z1	Wendland-Nordaltmark-Scholle	Östliche Weser-Elbe-Region
Hemmendorf Z1	Hils-Scholle	Südliche Weser-Elbe-Region
Remlingen 7	Elm-Scholle	Subherzyn-Region
Fürstenwalde 3	Mittenwalde-Scholle	Östliches Norddeutsches Becken
Schwerin 1/87	Ostholstein-Westmecklenburg-Block	Nördliches Norddeutsches Becken

6.4.1 Westliches Norddeutsches Becken

Zur Zeit der Sedimentation des Mittleren Muschelkalks lag das Depozentrum mit den größten Mächtigkeiten im Bereich des westlichen Norddeutschen Beckens. Die dort abgeteuften Bohrungen repräsentieren die normale und vollständige Beckenentwicklung des Mittleren Muschelkalks.

6.4.1.1 Ostfriesland-Region

Standard-Profil:	Bohrung Randzelgat Z1 (RNZG-Z1) , Abb. 34, 35, Anl. 7
TK25:	2406, Blatt Borkum
Regionaltektonische Einheit:	Borkum-Scholle
Strukturelle Position:	Synklinale zwischen Salzstrukturen Randzelgat (W) und Emshörn (E)
Mächtigkeit des mm:	154 m

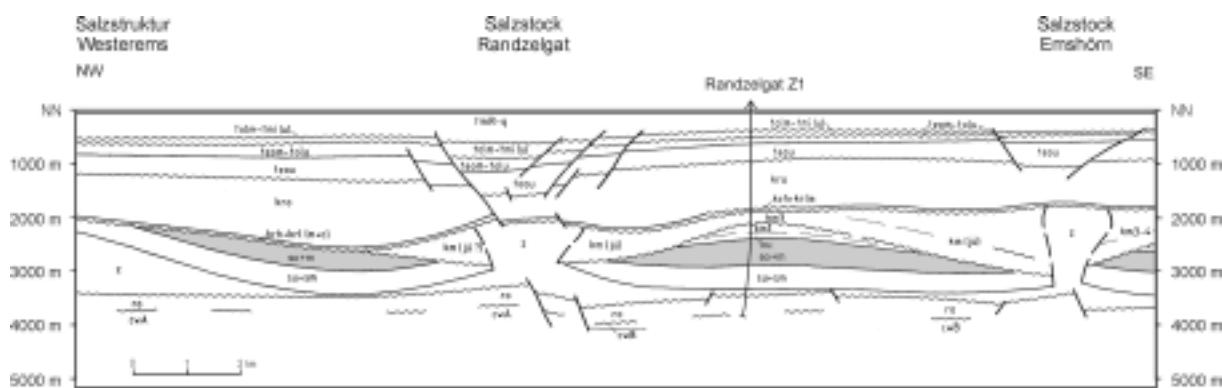


Abb. 34: Geologischer Schnitt von der Salzstruktur Westerems zum Salzstock Emshörn (nach FRISCH 1989)

Profilbeschreibung:

Im Profil Randzelgat Z1 endet der Untere Muschelkalk mit einer ca. 10 m mächtigen, nach Gamma-Ray und Sonic-Log relativ kompakten, zweigeteilten Karbonatbank, die durch eine gegenüber dem Liegenden geringere Gammastrahlung sowie eine deutlich geringere Schall-Laufzeit gekennzeichnet ist. Dieser Abschnitt wird dem Bereich der Schaumkalkbänke zugeordnet. Die Grenze zum Mittleren

Muschelkalk wird an die Oberkante dieser markanten Karbonatbank gelegt. Mit markanten Logspitzen deutlich höherer Gammastrahlung (G1 (T)) bzw. deutlich höherer Laufzeiten (S1 (T)) folgt dann der Mittlere Muschelkalk.

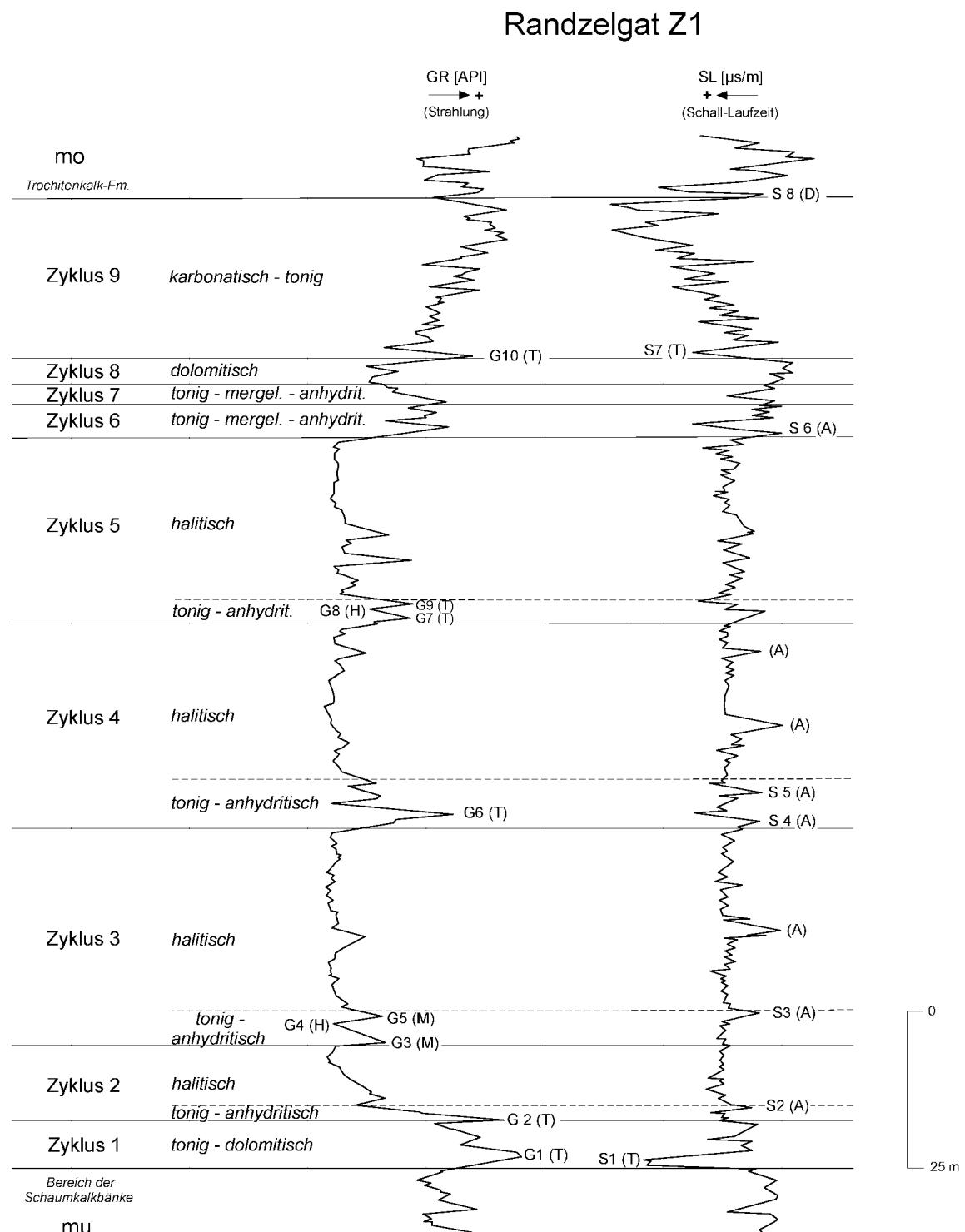


Abb. 35: Standardprofil des Mittleren Muschelkalks der Ostfriesland-Region - Bohrung Randzelgat Z1, (Abkürzungen s. Abb. 14)

Der etwa 154 m mächtige Mittlere Muschelkalk beginnt mit dem ca. 8 m relativ geringmächtigen **Zyklus 1**, der nach Spülproben von dolomitischen Tonsteinen, die untergeordnet bereits Anhydrit ent-

halten, aufgebaut wird. Auffällig ist eine Abnahme der Strahlung zum Hangenden, hervorgerufen durch eine Abnahme des Ton- bzw. eine Zunahme des Dolomitanteils. Dieser Trend wird auch im Sonic-Log deutlich, wo der Zyklus 1 ebenfalls mit einer sehr markanten Tonsteinspitze (S1 (T)) höherer Laufzeit beginnt. Der höhere, mehr dolomitisch entwickelte Teil des Zyklus 1 zeigt insgesamt geringere Laufzeiten. Jedoch weisen einzelne Ausschläge mit höheren Laufzeiten auf Tonstein-Einschaltungen hin, im Gamma-Ray-Log ebenfalls deutlich als Tonsteinspitzen (z. B. G1 (T)) erkennbar.

Mit dem ca. 12 m mächtigen **Zyklus 2** setzt in der Region Ostfriesland die vollsalinare Entwicklung ein. Erstmals treten in dieser beckenzentral gelegenen Region mächtige Halitbildungen auf. In den Bohrlochmesskurven zeigt der Zyklus 2 eine charakteristische Dreiteilung. Er beginnt an der Basis mit einem Tonmergelstein, der sich im Gamma-Ray-Log durch eine markante Logspitze höherer Strahlung (G2 (T)) deutlich hervorhebt. Darüber lagert, charakterisiert durch eine deutliche Abnahme der Laufzeiten im Sonic-Log, eine etwa 1 m mächtige Anhydritlage (S2 (A)), der im Hangenden ein ca. 10 m mächtiger SteinsalzhORIZONT folgt. Dieser Halithorizont weist in seinem unteren Teil tonig-mergelige Verunreinigungen auf, erkennbar im Gamma-Ray an einem markanten Ausschlag mit höheren Strahlungswerten sowie einer etwas unruhigen Sonic-Kurve mit einzelnen Laufzeiterhöhungen.

Der **Zyklus 3** bildet den zweiten Salinarhorizont des Mittleren Muschelkalks. Der basale Abschnitt dieses Zyklus zeigt eine für das gesamte Becken typische, immer wieder zu beobachtende Logkonfiguration. Dieser beginnt mit einer markanten Doppelspitze (G3 (M), G5 (M)) im Gamma-Ray-Log. Dieser Abschnitt wird ca. 6 m mächtig und besteht überwiegend aus Mergelsteinen. In diesen höherstrahlenden Abschnitt ist ein geringmächtiges (1,5 m) Steinsalzpaket (G4 (H)) zwischengeschaltet, deutlich erkennbar an den für Salze typischen niedrigen Strahlungswerten im Gamma-Ray-Log bzw. im Sonic-Log an der für Steinsalz typischen Laufzeit. Den Abschluss dieses basalen Abschnitts des Zyklus 3 bildet ein ca. 1 m mächtiger, aufgrund der relativ hohen Gammastrahlung vermutlich durch Ton- bzw. Tonmergelstein verunreinigter Anhydrit. Eindeutig zu identifizieren ist dieser anhydritische Horizont lediglich im Sonic-Log anhand geringerer Laufzeit (S3 (A)). Der sich an diesen Anhydrit anschließende, ca. 29 m mächtige obere Abschnitt des Zyklus 3 zeigt eine halitische Ausbildung. Eingeschaltet finden sich, ähnlich wie auch im Halit des Zyklus 2, einige maximal 3 m mächtige Anhydrit-(A) und Tonmergelsteinhorizonte.

Der ca. 32,5 m mächtige **Zyklus 4** weist eine dem Zyklus 3 ähnliche Ausbildung auf. Über dem basalen, ca. 7,5 m mächtigen Fuß, bestehend aus Wechsellagerungen von Anhydrit, Tonstein sowie tonigem Anhydrit (G6 (T), S4 (A), S5 (A)) folgt ein ca. 25 m mächtiges Steinsalzpaket, in das einzelne anhydritische Lagen (A) eingeschaltet sind.

Der **Zyklus 5** erreicht eine Gesamtmächtigkeit von ca. 30 m. Der basale, ca. 4 m mächtige, Teil dieses Zyklus wird im Gamma-Ray-Log durch eine Doppelspitze (G7 (T), G9 (T)) charakterisiert. Lithologisch besteht dieser Horizont aus einem anhydritischen, höherstrahlenden Tonstein, der durch ein zwischengeschaltetes, geringmächtiges und niedriger strahlendes Steinsalzlager (G8 (H)) in eine Unter- und eine Oberbank gegliedert wird. Der halitische obere Abschnitt des Zyklus 5 zeigt gegenüber den Halithorizonten der unterlagernden älteren Zyklen stärkere Verunreinigung durch tonige Einschaltungen.

Der Basis des **Zyklus 6** ist anhand einer deutlichen Anhydritspitze (S6 (A)) im Sonic-Log erkennbar. Dieser wird als regressiver Ast der Salinarentwicklung in dieser Region angesehen. Der über diesem Deckanhydrit folgende Abschnitt des Zyklus 6 liegt in normaler, d.h. schwach-salinarer Ausbildung vor. Typisch sind Tonmergelsteine mit deutlich erhöhten Gammastrahlungs- und Laufzeitwerten sowie im oberen Abschnitt des Zyklus anhydritisch dominierte Schichten.

Ähnlich wie der Zyklus 6 ist der **Zyklus 7** durch zyklische Wechsellagerungen von Tonmergelsteinen mit Anhydrit gekennzeichnet.

Im **Zyklus 8** setzt sich die karbonatische Sedimentation durch. Der Rückgang des Tonanteils und die zunehmende Dominanz des Karbonatanteils kommt vor allem im Gamma-Ray-Log durch eine

deutlich geringere Gammastrahlung zum Ausdruck, während Spitzen geringerer Laufzeiten im Sonic-Log auf einzelne anhydritische Zwischenlagen hinweisen.

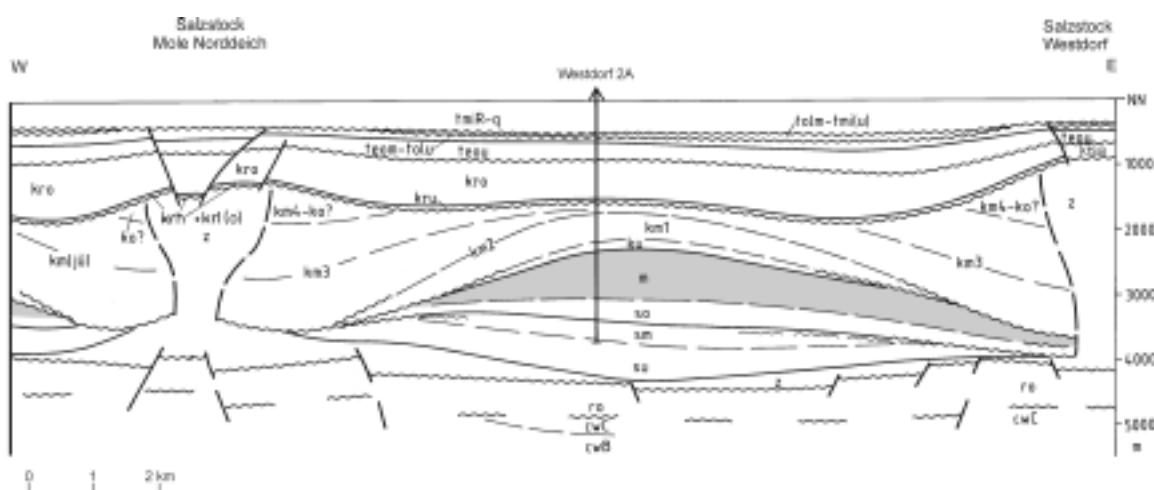
Das Einsetzen des **Zyklus 9** ist im Logbild an einer deutlichen „Einschnürung“ der Messkurven zu erkennen, hervorgerufen durch die erhöhten Gammastrahlungs- und Laufzeitwerte eines basalen Ton- bzw. Tonmergelsteinhorizonts (G10 (T), S7 (T)). Der Zyklus 9 gliedert sich in zwei Teilabschnitte. Für den unteren Teilabschnitt ist eine kontinuierliche Zunahme der Gammastrahlung sowie der Laufzeiten typisch. Dies deutet auf eine stetige Zunahme des Ton- bzw. Mergelsteinanteils in dieser vorwiegend karbonatischen Abfolge hin. Der obere Abschnitt ist im Gamma-Ray Log durch hohe Gammastrahlungswerte charakterisiert und weist auf Tonsteine hin, denen geringer strahlende Mergelkalke zwischengeschaltet sind.

Die Grenze zum Oberen Muschelkalk ist im Sonic-Log durch einen deutlichen Rückgang der Schall-Laufzeiten (S8 (D)), im Gamma-Ray Log durch eine Abnahme der Gammastrahlung gekennzeichnet. Nach Spülproben wird dieser Bereich dichten kalkigen Dolomiten zugeordnet, die in Wechsellagerung mit Kalkmergelsteinen auftreten und als Faziesäquivalent des Trochitenkalks angesehen werden.

6.4.1.2 Ostfriesland-Region, Sonderentwicklung Norderney-Westdorf-Scholle

Mit der im Bereich der Norderney-Westdorf-Scholle abgeteuften Bohrung Westdorf 2A wurde eines der mächtigsten Profile des Mittleren Muschelkalks des gesamten Norddeutschen Beckens aufgeschlossen. Lediglich die ebenfalls in dieser Struktureinheit etwa 830 m NNE gelegene Bohrung Norderney Z1 hat ein noch mächtigeres Profil (ca. 670 m) angetroffen. Störungsbedingt fehlt allerdings der Zyklus 9. Nach Vergleich mit der Bohrung Westdorf 2A (Abb. 38) beträgt der Schichtausfall für den Mittleren Muschelkalk ca. 85 m, so dass in der Bohrung Norderney Z1 sogar mit einer Gesamtstärke von ca. 755 m für den Mittleren Muschelkalk zu rechnen ist.

Standard-Profil:	Bohrung Westdorf 2A (WDRF-2A) , Abb. 36, 37, Anl. 7
TK25:	2309, Blatt Hage
Regionaltektonische Einheit:	Norderney-Westdorf-Scholle
Strukturelle Position:	Synklinale zwischen Salzstrukturen Westdorf (E) und Mole Norddeich (W)
Mächtigkeit des mm:	524 m



Profilbeschreibung:

Der **Zyklus 1** weist in der Bohrung Westdorf 2A mit einer Mächtigkeit von ca. 14 m (Norderney Z1: 39 m) die für das Norddeutsche Becken typische Mächtigkeit auf. Die Basis wird in einen Anstieg der Gammastrahlungswerte (G1 (T)) gelegt, der im Sonic-Log mit einer deutlichen Zunahme der Laufzeiten (S1 (T)) korrespondiert. Dieser in beiden Messkurven erkennbare Anstieg markiert den Wechsel von den Karbonaten des höchsten Unteren Muschelkalks zu der mehr tonig-mergeligen Entwicklung der Karlstadt-Formation. In den Logs ist eine Zweiteilung des Zyklus 1 erkennbar. Über einem karbonatisch-mergeligen unteren Abschnitt, der durch eine Abnahme der Gammastrahlung zum Hangenden hin charakterisiert wird, folgt ein im Gamma-Ray-Log höher strahlender oberer Abschnitt.

Während der Zyklus 1 noch eine für die Beckenachse des Norddeutschen Beckens typische Ausbildung besitzt, setzt mit Beginn des Zyklus 2 eine fazielle Sonderentwicklung des Mittleren Muschelkalks – mächtige Salinarentwicklung – ein. Ursache für diese ist die paläogeographische Lage der Bohrung im Bereich einer synsedimentär aktiven Grabenzone, dem Westdorf-Graben.

In der Bohrung Westdorf 2A setzt der etwa 38 m mächtige **Zyklus 2** (Norderney Z1: 68,5 m) mit einer stark tonigen Basis ein, erkennbar an einer deutlichen „Einschnürung“ in der Logkombination von Gamma-Ray (G2 (T)) und Sonic-Log (S2 (T)), hervorgerufen durch hohe Strahlungs- und Laufzeitwerte gegenüber den unter- bzw. überlagernden Schichten. Zum Hangenden wird der basale Tonstein nach Spülprobenbeschreibungen von Anhydritschlieren durchsetzt, die sich aufgrund ihrer geringen Mächtigkeit jedoch nicht in den Bohrlochmessungen durch markante Logspitzen bemerkbar machen. Darüber folgt der erste, ca. 24 m (Norderney Z1: 54 m) mächtige Steinsalzhorizont.

Die Basis des **Zyklus 3** (Westdorf 2A: 59 m, Norderney Z1: 88 m) wird durch einen Anstieg der Gammastrahlung definiert, hervorgerufen durch Ton- bzw. Tonmergelsteinlagen. Dieser basale Abschnitt des Zyklus 3 wird in der Bohrung Westdorf 2A ca. 5 m mächtig. Nach oben wird dieser Teilyklus durch eine deutliche Spitze im Sonic-Log (S3 (T)), d.h. einer Verschiebung der Kurve nach links zu höheren Laufzeiten hin, begrenzt. Den oberen Abschnitt des Zyklus 3 bildet ein ca. 54 m mächtiges Steinsalzpaket, das sowohl nach Gamma-Ray- als auch nach Sonic-Log lediglich durch geringmächtige Anhydritlagen verunreinigt ist, denn markante Anhydritspitzen, die auf mächtigere Anhydritlagen hindeuten, sind in den Logs nicht zu beobachten.

Die salinaren **Zyklen 4 - 7** weisen in der Bohrung Westdorf 2A nach ihren Logbildern alle die gleiche Ausbildung auf. Der basale Abschnitt der einzelnen Zyklen wird jeweils von einem Ton- bis Tonmergelstein gebildet, der vor allem im Gamma-Ray-Log besonders gut hervortritt. Dieser durch eine höhere Gammastrahlung gekennzeichnete Abschnitt erreicht mit Ausnahme des Zyklus 4, wo er etwa 5 m mächtig ist, in allen Zyklen (5 - 7) eine annähernd gleiche Mächtigkeit von etwa 12 - 14 m. Ursache für die deutliche Mächtigkeitserhöhung der Basisbereiche der Zyklen 5 - 7 ist vor allem deren Steinsalzführung, denn den basalen Tonmergelsteinen dieser Zyklen sind, wie die Bohrlochmessungen zeigen, Steinsalzlagen zwischengeschaltet. Ähnliches wurde auch in der Bohrung Remlingen 7 für die Basis des Zyklus 4 (Kap. 5.4.3) festgestellt. Dagegen zeichnet sich das basale Tonmergelsteinpaket des Zyklus 4 durch seine Kompaktheit aus, in den Bohrlochmessungen deutlich erkennbar an einem breiten, un gegliederten Ausschlag. Die Steinsalzpakte der Zyklen 5 - 7 zeigen gegenüber den Hallithorizonten der Zyklen 2 und 3 eine deutliche Zunahme an Verunreinigungen, die bis zu mehrere m mächtig werden können. Festzustellen ist, dass diese Verunreinigung nach der Logausbildung innerhalb der Horizonte zum Hangenden hin abnehmen, wobei jedoch der Verunreinigungsgrad der Horizonte selbst vom Zyklus 4 bis zum Zyklus 7 ansteigt. Anders als in der Bohrung Randzelgat Z1 bestehen diese Verunreinigungen in der Bohrung Westdorf 2A vor allem aus Ton- und Tonmergelsteinen, wie dies in den Logs an charakteristischen Spitzen (T) mit höherer Strahlung (Gamma-Ray-Log) bzw. mit höheren Laufzeiten (Sonic-Log) erkennbar ist. Diese Veränderungen in der Zusammensetzung der Verunreinigungen wird auf eine detritische Materialzufuhr zurückgeführt. Das Steinsalzpaket des Zyklus 4 erreicht mit ca. 88 m in der Bohrung Westdorf 2A (Norderney Z1: 122 m) seine größte

Mächtigkeit, während das Steinsalzlager des Zyklus 5 ca. 75 m, das des Zyklus 6 ca. 59 m sowie das des Zyklus 7 ca. 63 m mächtig wird (Norderney Z1: 129,5, 85 und 67 m).

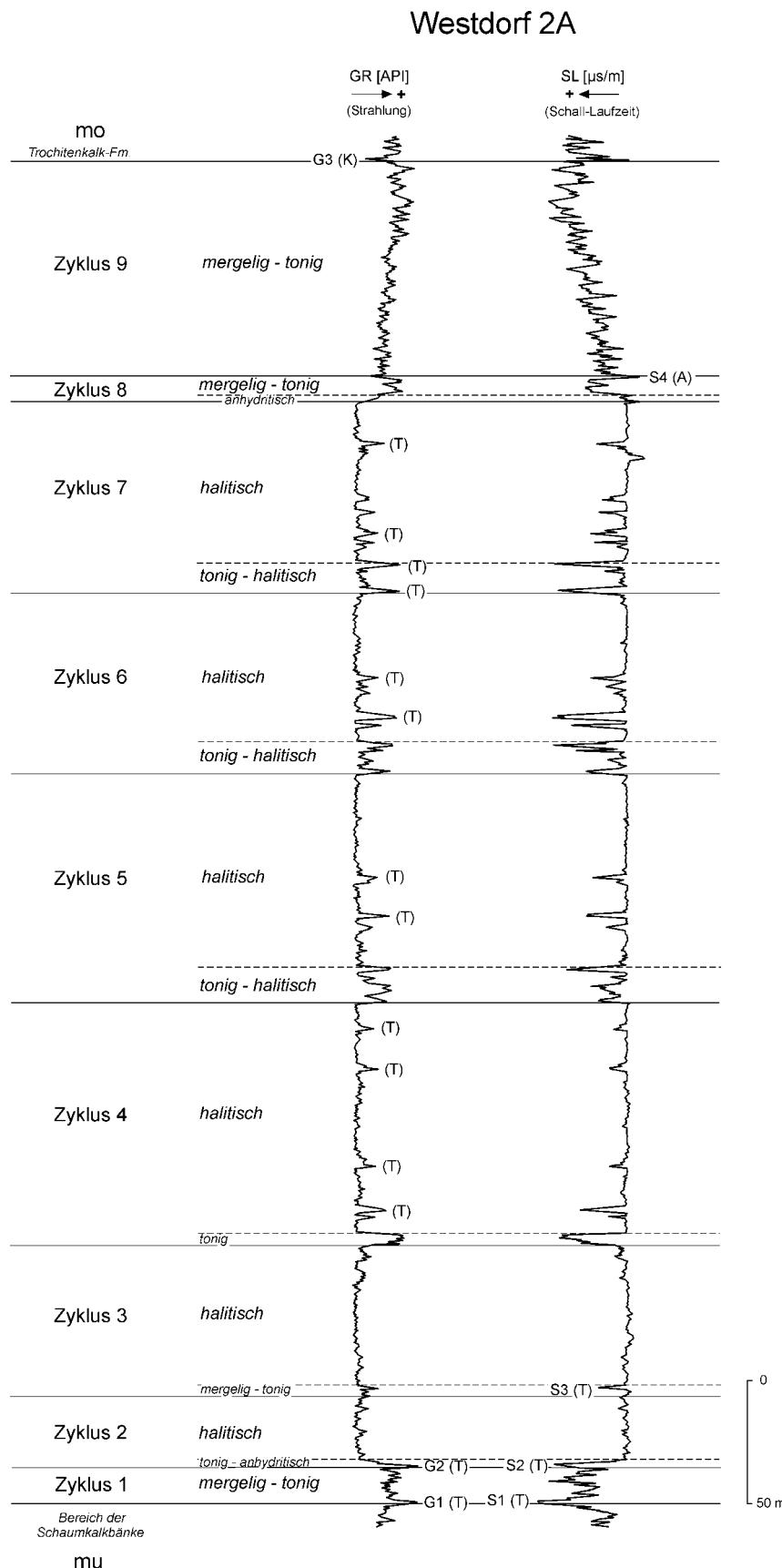


Abb. 37: Standardprofil des Mittleren Muschelkalks der Ostfriesland-Region, Sonderentwicklung Norderney-Westendorf-Scholle – Bohrung Westdorf 2A, (Abkürzungen s. Abb. 14)

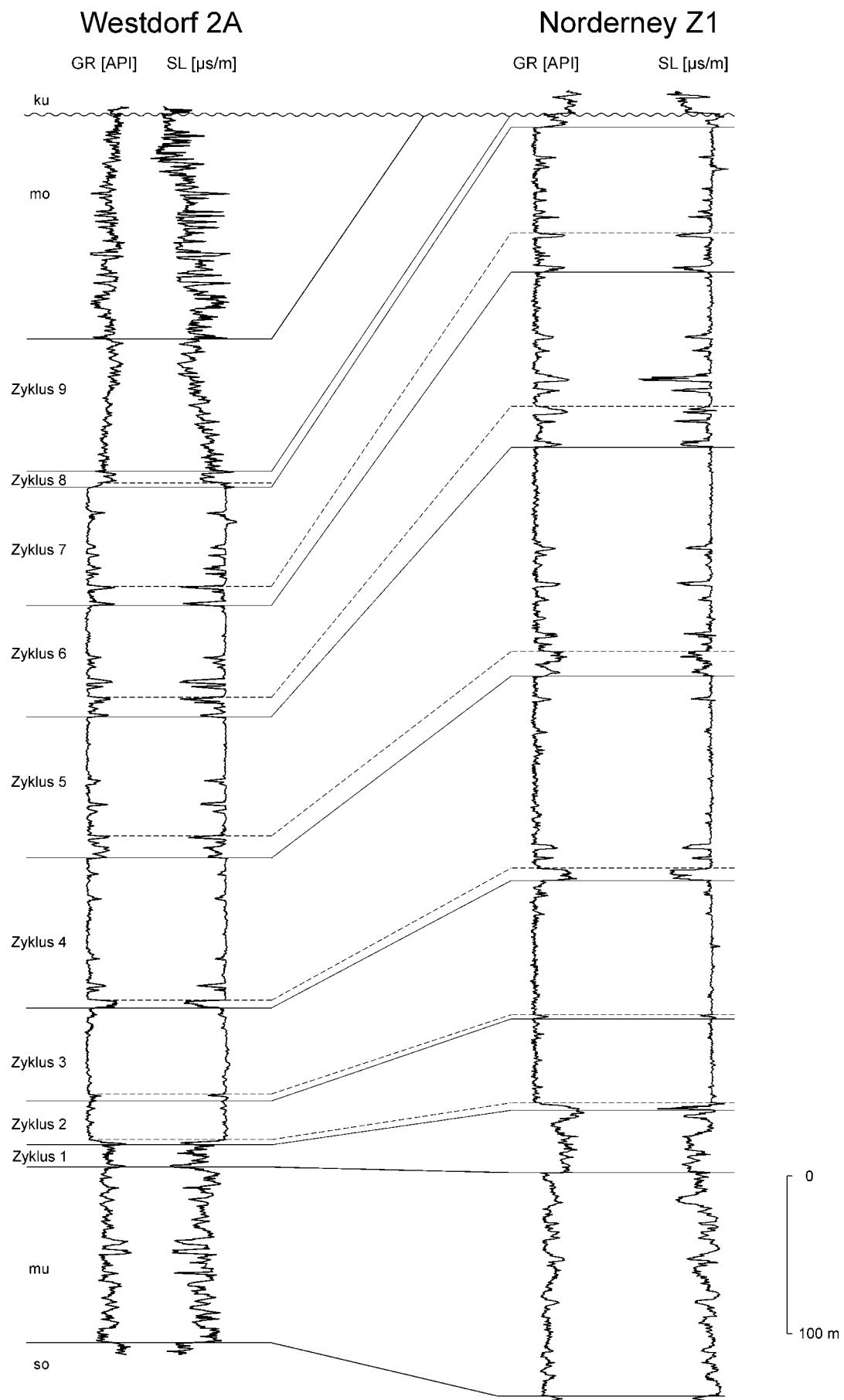


Abb. 38: Korrelation des Mittleren Muschelkalks der Bohrung Westdorf 2A mit der Bohrung Norderney Z1

Die Basis des **Zyklus 8** ist ähnlich dem Zyklus 6 der Bohrung Randzelgat Z1 stärker anhydritisch ausgebildet und kann hier ebenfalls als Deckanhdydit bzw. Abschluss der salinaren Entwicklung deutet werden. Der obere Abschnitt des Zyklus 8 wird von Ton- bis Tonmergelsteinen aufgebaut, wobei der höchste Teil nach Spülproben von einem anhydritischen Mergelstein gebildet wird (S4 (A)). Die Gesamtmächtigkeit dieses Zyklus liegt bei ca. 10 m in der Bohrung Westdorf 2A. In der Bohrung Norderney Z1 ist der Mittlere Muschelkalk im Bereich des Zyklus 8 transgressiv gekappt. Die Restmächtigkeit des Zyklus 8 beträgt 9 m.

Der **Zyklus 9** fällt durch seine mit 83 m (Westdorf 2A) extrem hohe Mächtigkeit auf. Eine Zweiteilung dieses Zyklus, wie sie bereits für die Bohrung Randzelgat Z1 beschrieben wurde, kann auch hier beobachtet werden. Für den unteren Abschnitt ist ein leichter, aber kontinuierlicher Anstieg sowohl der Gammastrahlung wie auch der Laufzeiten zum Hangenden hin zu registrieren. Der obere Abschnitt zeichnet sich dagegen durch insgesamt etwas höhere Werte aus.

Die Obergrenze des Mittleren gegen den Oberen Muschelkalk wird in einen deutlichen Abfall der Laufzeiten (Sonic-Log) sowie der Strahlungswerte (Gamma-Ray-Log (G3 (K)) gelegt, der auch hier das Einsetzen der Trochitenkalk-Fazies markiert.

Wie die Logkorrelationen zeigen, weist in der Bohrung Westdorf 2A nicht nur der Mittlere Muschelkalk eine von der Normalentwicklung der zentralen Bereiche des Norddeutschen Beckens abweichende Faziesentwicklung und eine deutlich erhöhte Mächtigkeit auf, sondern auch der Obere Muschelkalk besitzt deutlich höhere Mächtigkeiten. Dies deutet darauf hin, dass die im Mittleren Muschelkalk einsetzende erhöhte Subsidenz im Bereich der Norderney-Westdorf-Scholle bzw. des Westdorf-Grabens sich während des Oberen Muschelkalks fortsetzte.

6.4.1.3 Nördliche Weser-Ems-Region

Standard-Profil:	Bohrung Ganderkesee Z1 (GDKS-Z1, Abb. 39, 40, Anl. 10)
TK25:	2917, Blatt Delmenhorst
Regionaltektonische Einheit:	Südoldenburg-Scholle
Strukturelle Position:	südlich Salzstruktur Delmenhorst
Mächtigkeit des mm:	122 m

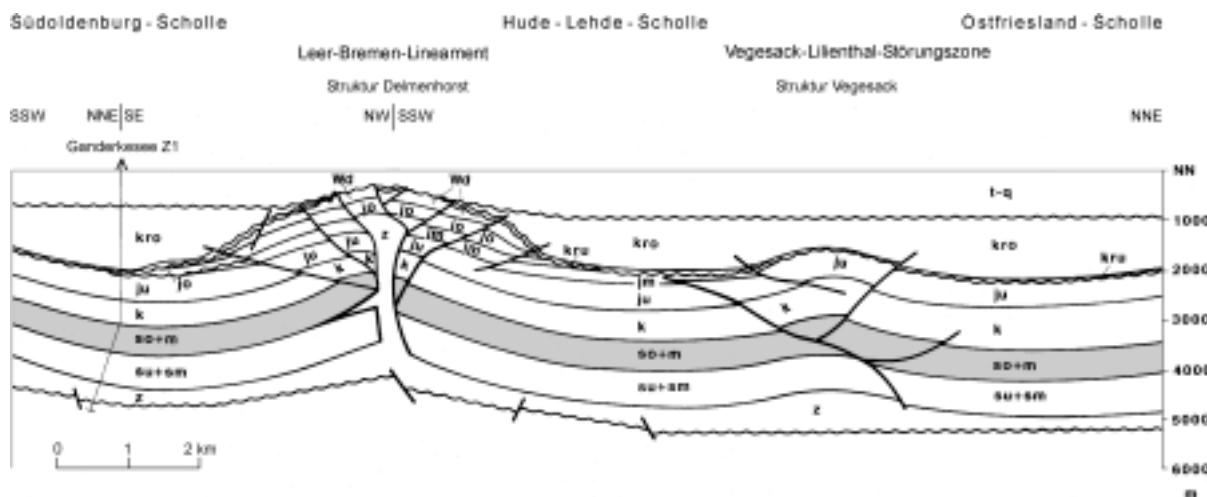


Abb. 39: Geologischer Schnitt durch die Struktur Delmenhorst (nach BALDSCHUHN et al. 1996)

Profilbeschreibung:

Die Bohrung Ganderkesee Z1 wurde als Referenzprofil der Region Weser-Ems ausgewählt. Mit etwa 122 m erreicht der Mittlere Muschelkalk hier eine für das zentrale Norddeutsche Becken typische Mächtigkeit und Faziesausbildung. In diesem Bohrprofil wurden insgesamt 3 Steinsalzhorizonte ange troffen.

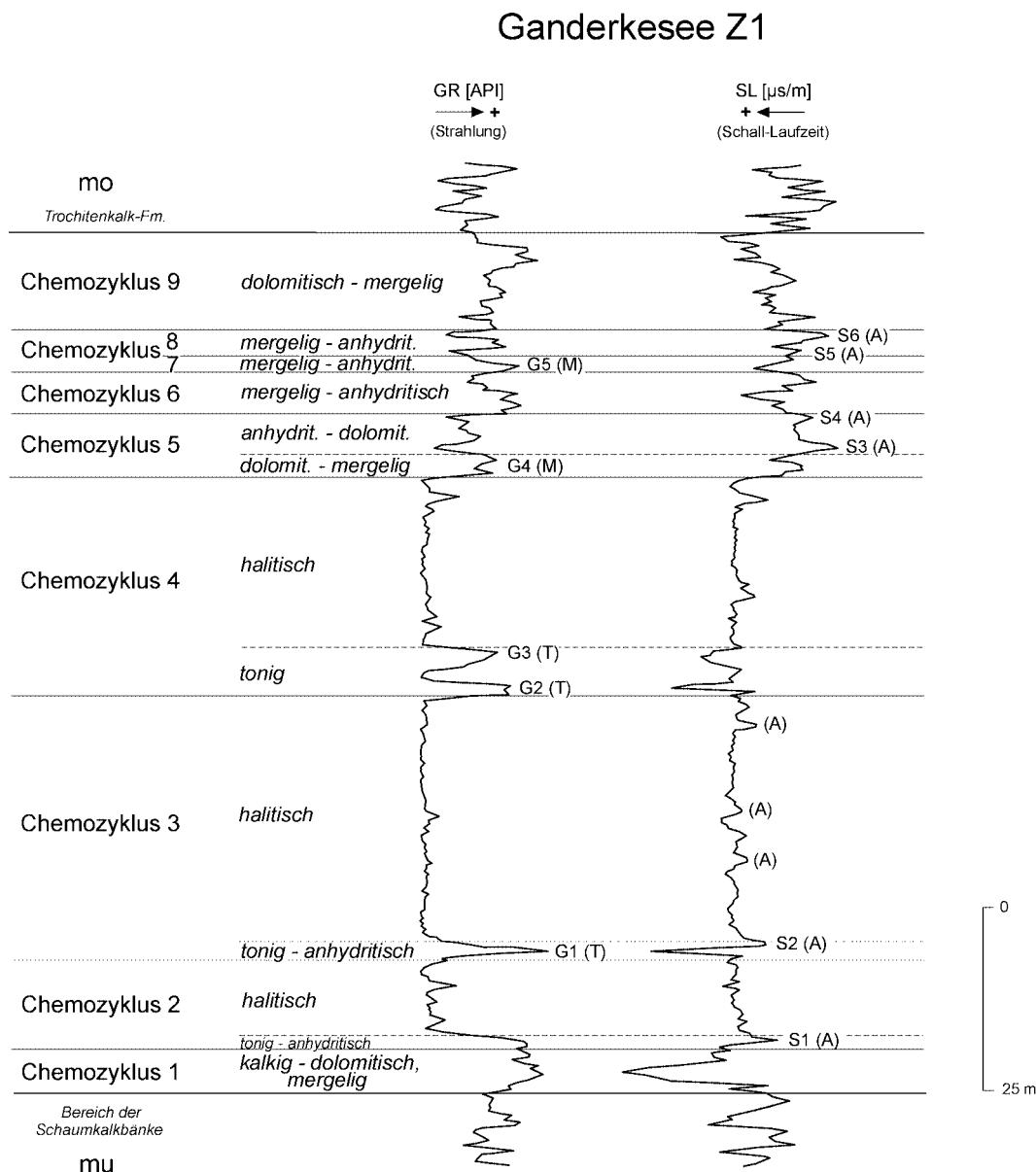


Abb. 40: Standardprofil für den Mittleren Muschelkalk der nördlichen Weser-Ems-Region – Bohrung Ganderkesee Z1, (Abkürzungen s. Abb. 14)

Der Untere Muschelkalk endet mit einer 4 m mächtigen kompakten Kalksteinbank, die durch ein mergeliges Zwischenmittel zweigeteilt ist und die dem Bereich der Schaumkalkbänke zugeordnet wird. Darüber folgt mit einem Anstieg der Laufzeiten im Sonic-Log sowie der Gammastrahlung der **Zyklus 1** des Mittleren Muschelkalks. Dieser ca. 6 m mächtige Horizont wird von dolomitischen Kalk- bis Kalkmergelsteinen aufgebaut, wobei der Mergelgehalt im oberen Teil des Zyklus deutlich erhöht ist.

Die Basis des 12 m mächtigen **Zyklus 2** bilden relativ undeutliche Logspitzen im Gamma-Ray- und im Sonic-Log, hervorgerufen durch einen geringmächtigen Mergelsteinhorizont. Darüber folgt ein ebenfalls geringmächtiger Anhydrit, der sich jedoch im Sonic-Log aufgrund seiner niedrigen Laufzeit (S1 (A)) deutlich abhebt. Über diesem insgesamt ca. 2 m mächtigen Fuß des Zyklus 2 folgt, wie bereits aus der Bohrung Randzelgat Z1 bekannt, der erste Halithorizont des Mittleren Muschelkalks, der hier etwa 10 m mächtig wird.

Die Basis des **Zyklus 3** (36 m mächtig) tritt in den Logs trotz ihrer geringen Mächtigkeit von lediglich 2 m markant hervor. Dieser basale Abschnitt beginnt mit einem Tonstein (G1 (T)), dem ein Anhydrit (S2 (A)) folgt. Darüber schließt sich der Halithorizont des Zyklus 3 an, der mit ca. 34 m den mächtigsten der drei erbohrten Salzhorizonte darstellt. Einzelne Spitzen geringerer Laufzeiten im Sonic-Log (A) weisen auf anhydritische Verunreinigungen innerhalb dieses Salzlagers hin. Die Basis des **Zyklus 4** ist im Gamma-Ray-Log an einer markanten Doppel spitze (G2 (T), G3 (T)) erkennbar. Beide Logspitzen korrespondieren mit jeweils 2 bis 3 m mächtigen Ton- bis Tonmergelsteinlagen, denen ein ca. 2 m mächtiges Halitlager zwischengeschaltet ist. Den Abschluss des Zyklus 4 bildet ein weiterer Halithorizont, der hier ca. 23 m mächtig ist und mit dem die Halitsedimentation in der Bohrung Ganderkesee Z1 ihren Abschluss findet.

Im **Zyklus 5** (ca. 9 m) reicht die salinare Entwicklung nur noch bis zur Sulfatausscheidung. Die Basis dieses Zyklus bildet im Gamma-Ray-Log eine relativ kompakte, zweigeteilte Spitze (G4 (M)), die einem Dolomitmergel zugeordnet wird. Für den oberen Bereich sind zwei Anhydritspitzen im Sonic-Log (S3 (A), S4 (A)) charakteristisch. Die Mächtigkeit des Zyklus 5 ist mit ca. 9 m gegenüber etwa 30 m in der Bohrung Randzelgat Z1 relativ gering, wobei aber die Basisbereiche der Zyklen in beiden Bohrungen eine ähnliche Mächtigkeit von etwa 3 bis 4 m aufweisen. Ursache für die deutliche Mächtigkeitsreduktion ist die gegenüber der Bohrung Randzelgat Z1 fehlende Halitführung.

Der ca. 6 m mächtige **Zyklus 6** ist in den geophysikalischen Bohrlochmessungen deutlich zweigeteilt. Lithologisch besteht er aus einem Dolomitmergel an der Basis sowie einen Anhydrit im Hangenden

Die Mergelsteine, die den **Zyklus 7** aufbauen, zeichnen sich in den Logs durch markante Spitzen höherer Gammastrahlung (G5 (M)) und höherer Laufzeit deutlich von den unter- bzw. überlagernden Schichten ab. Ein geringmächtiger Anhydrit (S5 (A)) schließt diesen mit ca. 2 m geringmächtigen Zyklus ab.

Die Basis des **Zyklus 8** besteht nach Bohrlochmessungen möglicherweise aus einem anhydritischen Dolomit. Den Abschluss dieses ca. 3,5 m mächtigen Zyklus bildet eine markante Logspitze geringere Laufzeiten (S6 (A)), die auf eine geringmächtige Anhydritlage zurückgeführt wird.

Der den Abschluss des Mittleren Muschelkalks bildende, ca. 13 m mächtige **Zyklus 9** ist wiederum deutlich zweigeteilt. Beide Teilabschnitte, die von Dolomiten und Dolomitmergelsteinen aufgebaut werden, sind durch einen zum Hangenden hin kontinuierlichen Anstieg der Gammastrahlung und der Laufzeiten, hervorgerufen durch eine Zunahme des Tongehaltes, gekennzeichnet. Mit einem markanten Abfall in den Laufzeiten setzen darüber die Kalksteine des Oberen Muschelkalks ein.

6.4.1.4 Südliche Weser-Ems-Region

Standard-Profil:	Bohrung Fürstenau Z1 (FRST-Z1) , Abb. 41, 42, Anl. 10)
TK25:	3411, Blatt Lengerich
Regionaltektonische Einheit:	Neuenkirchen-Scholle
Strukturelle Position:	Neuenkirchener Sattel
Mächtigkeit des mm:	49 m

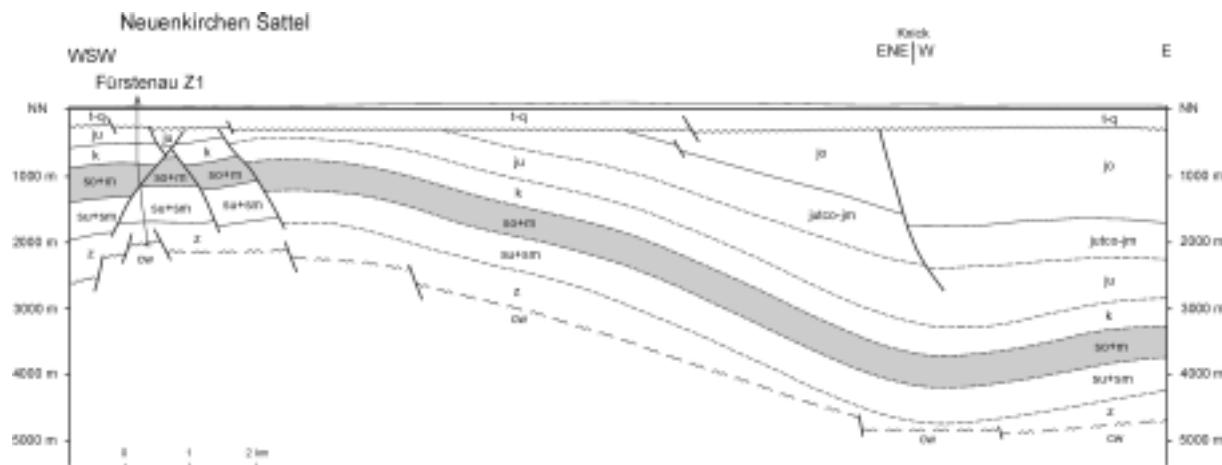


Abb. 41: Geologischer Schnitt durch den Neuenkirchener Sattel (nach FRISCH 1985)

Profilbeschreibung:

Mit der Bohrung Fürstenau Z1 wurde ein Profil mit extrem geringmächtigem Mittleren Muschelkalk aufgeschlossen. Die Liegendgrenze ist auch hier durch einen deutlichen Anstieg der Gammastrahlung sowie einer damit korrespondierenden Zunahme der Laufzeiten markiert und ist daher gut zu fassen.

Der **Zyklus 1** zeigt eine der Bohrung Ganderkesee Z1 ähnliche lithologische Ausbildung und Mächtigkeit. Charakteristisch ist eine sichtbare Zweiteilung der Gamma-Kurve in einen kompakteren Bereich an der Basis und einen gering höherstrahlenden, vorwiegend mergelig-dolomitischen Bereich im höheren Teil. Die Gesamtmächtigkeit dieses Zyklus beträgt ca. 10 m.

Der oberhalb des Zyklus 1 gelegene Teil des Mittleren Muschelkalks ist durch eine deutliche Mächtigkeitsreduktion gekennzeichnet, die aber alle Zyklen gleichermaßen betrifft. Dennoch lässt sich jeder einzelne Zyklus sicher abgrenzen. Zur Ablagerung von Steinsalzen ist es vermutlich nicht mehr gekommen.

Charakteristisch für die einzelnen Zyklen, insbesondere aber der **Zyklen 2 - 6**, ist ein stetiger Wechsel von dolomitisch-mergeliger Sedimentation an der Basis des jeweiligen Zyklus und anhydritischer Sedimentation im höheren Teil. Im Gamma-Ray-Log kommt diese Entwicklung in einem stetigen Wechsel von höherstrahlenden Abschnitten an der Basis und geringerstrahlenden Bereichen im höheren Teil der Zyklen deutlich zum Ausdruck. Die Mächtigkeiten der einzelnen Zyklen betragen:

- Zyklus 2: ca. 3,5 m
- Zyklus 3: ca. 3,0 m
- Zyklus 4: ca. 4,5 m
- Zyklus 5: ca. 7,0 m
- Zyklus 6: ca. 4,5 m

Der **Zyklus 7** (ca. 2,5 m) besteht wie in der Bohrung Ganderkesee Z1 in charakteristischer Weise aus einem kompakten Mergelsteinpaket, das in den Bohrlochmessungen mit Einzelspitzen höherer Strahlung (Gamma-Ray-Log) bzw. höherer Laufzeiten (Sonic-Log) korrespondiert.

Der **Zyklus 8** (5 m) ist überwiegend dolomitisch ausgebildet und erreicht mit 5 m eine annähernd beckentypische Mächtigkeit.

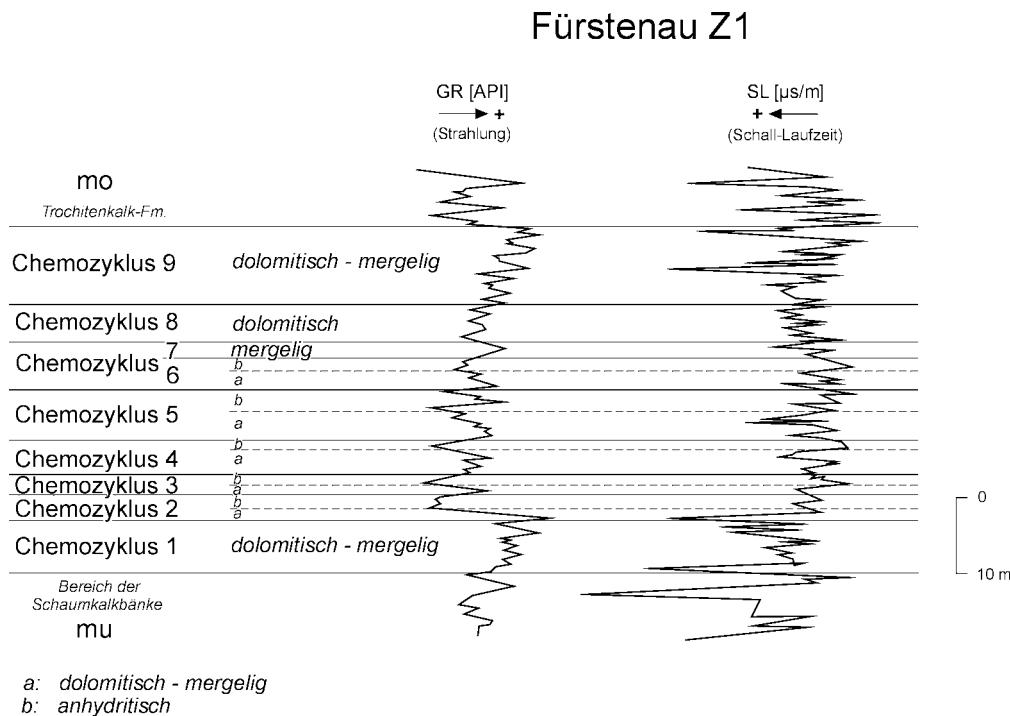


Abb. 42: Standardprofil des Mittleren Muschelkalks der südlichen Weser-Ems-Region – Bohrung Fürstenau Z1, (Abkürzungen s. Abb. 14)

Der **Zyklus 9** ist durch einen kontinuierlichen Anstieg der Gammastrahlung gekennzeichnet, während das Sonic-Log einen unruhigen Verlauf aufweist. Lithologisch handelt es sich um Dolomite, deren Tongehalte innerhalb des Zyklus deutliche Schwankungen aufweisen sowie nach oben hin leicht ansteigen. Dieser Zyklus wird ca. 11 m mächtig, wobei die in den zuvor beschriebenen Referenzprofilen erkennbare Zweiteilung hier nicht mehr so deutlich hervortritt.

Die Grenze zum Oberen Muschelkalk wird auch in der Bohrung Fürstenau Z1 in einen markanten Abfall der Gammastrahlung bzw. der Laufzeit gelegt, so dass sich die Trockitenkalk-Formation aufgrund ihrer überwiegend kalkigen Ausbildung deutlich vom Mittleren Muschelkalk abhebt.

6.4.2 Zentrales Norddeutsches Becken

6.4.2.1 Westliche Weser-Elbe-Region

Standard-Profil:	Bohrung Krusenhausen Z1 (KRSH-Z1) , Abb. 43, 44, Anl. 7)
TK25:	3223, Blatt Hodenhagen
Regionaltektonische Einheit:	Winsen-Scholle
Strukturelle Position:	Struktur Hodenhagen
Mächtigkeit des mm:	155 m
Profilbeschreibung:	

Die Bohrung Krusenhausen Z1 ist wie auch die Bohrung Ganderkesee Z1 typisch für die Beckenfazies des Mittleren Muschelkalks. Sie zeichnet sich jedoch gegenüber jener durch deutlich höhere Mächtigkeiten aus.

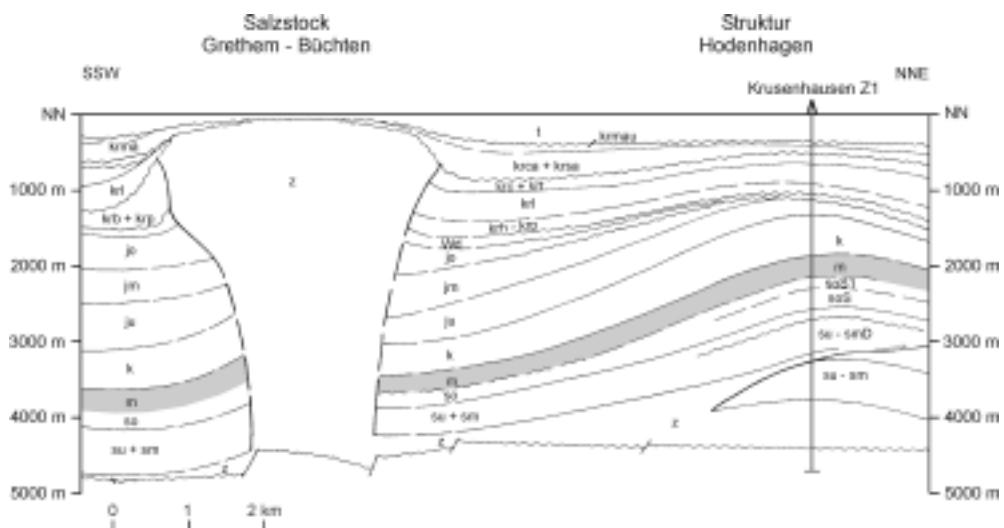


Abb. 43: Geologischer Schnitt durch die Struktur Hodenhagen (nach BALDSCHUHN 1985)

Der Untere Muschelkalk endet mit einer ca. 3 m mächtigen, relativ kompakten Kalksteinbank. Der den Mittleren Muschelkalk einleitende **Zyklus 1** erreicht eine Mächtigkeit von ca. 11 m und setzt sich aus einer Abfolge von Dolomitmergeln, Dolomit sowie Mergelsteinen zusammen. Die Untergrenze des Mittleren Muschelkalks gegen die Schaumkalkbänke wird in einen markanten Anstieg der Gammastrahlung bzw. der Laufzeiten gelegt. Der Zyklus 1 gliedert sich in zwei Teilabschnitte, wobei der obere Bereich deutlich geringere Schall-Laufzeiten aufweist.

Mit dem **Zyklus 2** (ca. 5 m) setzt die stärker salinare Ausbildung des Mittleren Muschelkalks ein. Der ca. 2 m mächtige basale Teil des Zyklus 2 besteht aus Ton- bis Tonmergelsteinen, wobei dieser Teilzyklus gegenüber den unter- und überlagernden Schichten durch etwas höhere Strahlungs- und Laufzeitwerte (G1 (T), S1 (T)) gekennzeichnet ist. In der Kombination von Gamma-Ray- und Sonic-Log ist dieses Schichtpaket an einer leichten Einschnürung im Logbild zu erkennen. Der obere Abschnitt des Zyklus 2 wird nach den Bohrlochmessungen von einem ca. 3 m mächtigen Anhydrit gebildet, im Logbild erkennbar an einem starken Abfall der Gammastrahlung sowie der Laufzeiten gegenüber dem tieferen tonig-mergeligen Teil des Zyklus.

Der ca. 50 m mächtige **Zyklus 3** beginnt ähnlich dem unterlagernden Zyklus mit einer charakteristischen Tonsteinspitze (G2 (T), S2 (T)), die nach Sonic-Log von einem Anhydrit (S3 (A)) überlagert wird. Diesem basalen Teil des Zyklus 3, der etwa 3 m mächtig ist, folgt dann als Abschluss das erste, ca. 47 m mächtige Steinsalzpaket, das nach Logausbildung kaum verunreinigt ist.

Die Untergrenze des **Zyklus 4** (ca. 42 m) ist aufgrund einer markanten Doppelspitze im Gamma-Ray-Log gut zu identifizieren. Diese Doppelspitze (G3 (T), (G5 (T))) verursachen höher strahlende Tonmergelsteine, die durch eine zwischengelagerte, niedriger strahlende Steinsalzlage (G4 (H)) in zwei Teilbänke gegliedert werden. Der über diesem ca. 9 m mächtigen unteren Abschnitt des Zyklus 4 folgende höhere Teil wird von einem ca. 33 m mächtigen Steinsalzpaket gebildet.

Der ca. 7 m mächtige Fuß des insgesamt 17,5 m mächtigen **Zyklus 5** besteht aus einer Abfolge von Anhydrit und Ton- bis Tonmergelsteinen. Dieser Bereich zeichnet sich gegenüber dem unterlagernden halitischen Teil des Zyklus 4 durch deutlich erhöhte Strahlungs- und Laufzeitwerte aus. Auch der darüber folgende obere Abschnitt des Zyklus 5 zeigt insgesamt geringere Gammastrahlung. Zwei deutliche Laufzeitspitzen (S4A), S5 (A)) deuten auf zwei mehr anhydritisch entwickelte Bereiche hin, denen ein Steinsalzpaket zwischengelagert ist. Letzteres ist im Kaliber-Log anhand der dort erkennbaren Bohrlochauskesselungen eindeutig zu identifizieren.

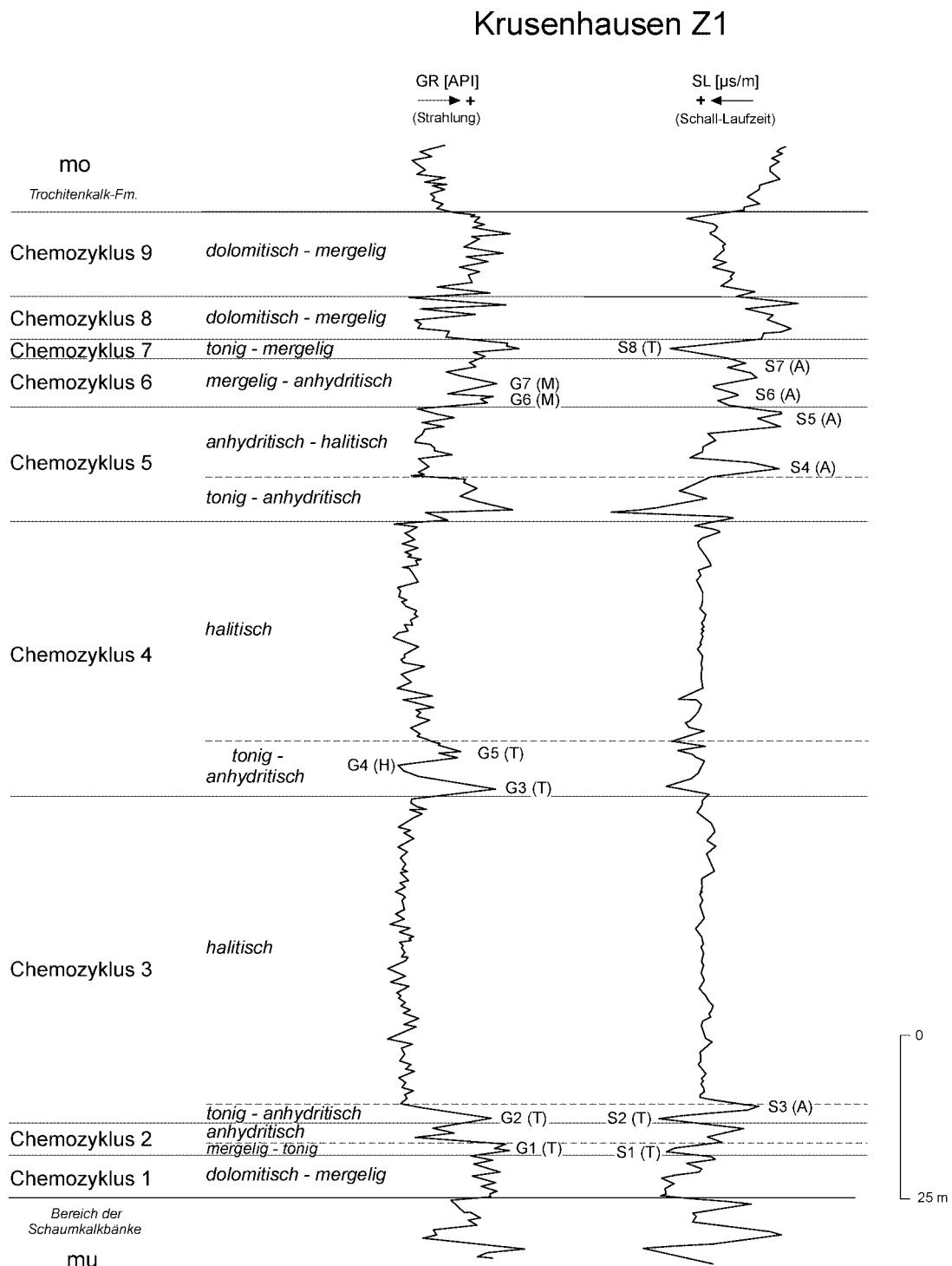


Abb. 44: Standardprofil des Mittleren Muschelkalks der südlichen Weser-Ems-Region – Bohrung Krusenhausen Z1, (Abkürzungen s. Abb. 14)

Mit Beginn des **Zyklus 6** ist die vollsalinare Sedimentation abgeschlossen. Die Basis dieses Zyklus fällt wiederum in einen deutlichen Anstieg der Gammastrahlung sowie der Laufzeit. Der ca. 7 m mächtige Zyklus zeigt eine charakteristische Zweiteilung mit Dolomitmergeln (G6 (M), G7 (M)) an der Basis, die durch einen geringmächtigen Anhydrit (S6 (A)) in zwei etwas mächtigere (ca. 2 bis 3 m) Bänke aufgespalten werden, gefolgt von einem ebenfalls zweigeteilten anhydritischen Abschnitt (S7 (A)).

Am Aufbau des **Zyklus 7** sind vor allem Tonmergelsteine beteiligt. Kennzeichnend für diesen ca. 3 m mächtigen Zyklus ist eine markante Logspitze höherer Laufzeit (S8 (T)), die sich regional korrelieren lässt.

Der ca. 7 m mächtige **Zyklus 8** zeigt gegenüber den unterlagernden Zyklen deutlich geringere Gammastrahlungswerte sowie Schall-Laufzeiten. Während der untere Kurvenabschnitt dieses Zyklus relativ kompakt mit wenig wechselnden Intensitäten ausgebildet ist und Dolomiten zugeordnet wird, deutet der unruhige Charakter des oberen Kurvenabschnitts auf Wechsellagerungen von Dolomiten und Dolomitmergeln hin.

Den Abschluss des Mittleren Muschelkalks bildet (**Zyklus 9**) eine ca. 13 m mächtige und vorwiegend mergelig entwickelte Schichtenfolge. Anhand der Gamma-Ray- und Sonic-Log-Kurve ist im unteren Abschnitt dieses Zyklus eine generelle Zunahme des Tonsteingehalts zum Hangenden hin festzustellen. Der obere Bereich zeichnet sich dagegen durch insgesamt etwas geringere Gammastrahlungswerte aus. Darüber beginnt der Obere Muschelkalk mit einem relativ kompakten Kalkstein, der der Trochitenkalk-Formation zugeordnet wird. Der mit diesem lithologischen Wechsel einhergehende Strahlungsabfall bzw. Rückgang in den Laufzeiten markiert auch hier anhand eines charakteristischen Logbildes die Grenze Mittlerer /Oberer Muschelkalk.

6.4.2.2 Östliche Weser-Elbe-Region

Standard-Profil:	Bohrung Volzendorf-Z1 (VZDF-Z1, Abb. 45, 46, Anl. 8)
TK25:	3133, Blatt Pretzier
Regionaltektonische Einheit:	Wendland-Nordaltmark-Scholle
Strukturelle Position:	Synklinale zwischen Salzstrukturen Wustrow (E) und Bockleben (W)
Mächtigkeit des mm:	103 m

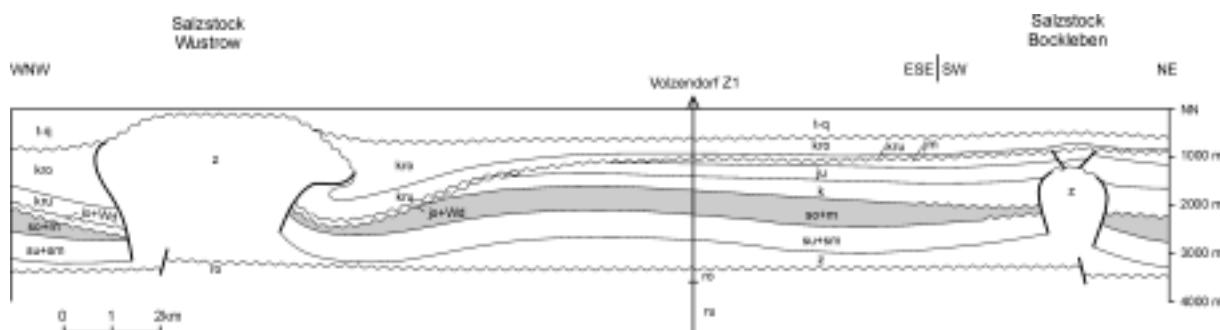


Abb. 45: Geologischer Schnitt durch die Wendland-Nordaltmark-Scholle (nach BALDSCHUHN et al. 1996)

Profilbeschreibung:

Auch in der Bohrung Volzendorf Z1 endet der Untere Muschelkalk mit einer kompakten, hier jedoch zweigeteilten Karbonatbank. Der ca. 8 m mächtige **Zyklus 1** setzt mit einer Wechsellagerung von Dolomiten, Dolomitmergeln sowie Tonmergelsteinen ein. Dabei enthält jedoch der obere Abschnitt des Zyklus 1 deutlich mächtigere Tonmergelsteinlagen (G1 (T), G2 (T)) als der untere.

Der **Zyklus 2** (4 m) ist gegenüber dem Zyklus 1 durch eine stärker salinare Entwicklung gekennzeichnet. Hier ist es jedoch offensichtlich nur bis zur Sulfatausscheidung gekommen. Der ca. 1 m mächtige basale Teil des Zyklus ist vorwiegend tonig entwickelt und in den Bohrlochmessungen durch eine markante Logspitze höherer Gammastrahlung (G3 (T)) gekennzeichnet, denen im Sonic-Log eine Spitze (S1(T)) höherer Laufzeit entspricht. Darüber folgt dann im Sonic-Log ein kompakter Ausschlag (S2 (A)) geringerer Laufzeit. Diese Logspitze wird einem ca. 2 m mächtigen Anhydrit zugeordnet.

Der basale Teil des insgesamt 30 m mächtigen **Zyklus 3** erreicht eine Mächtigkeit von 2 m und zeigt eine charakteristische Ausbildung. Über einem geringmächtigen Tonmergelsteinhorizont (G4 (T), S3 (T)) folgt ein ebenfalls geringmächtiger Anhydrit (S4 (A)). Der obere Abschnitt wird von Haliten aufgebaut. Dieses Steinsalzpaket enthält einzelne Lagen von Anhydrit (S5 (A), S6 (A), S7 (A)) und Tonmergelstein (G5 (T)), deutlich erkennbar an den entsprechenden Spitzen in den ansonsten ruhigen, kaum gegliederten Messkurven dieses Abschnitts.

Der Basisbereich des **Zyklus 4** zeigt mit ca. 8 m eine ähnliche Mächtigkeitsentwicklung und lithologische Ausbildung wie in den zuvor beschriebenen Bohrungen. Charakteristisch ist für diesen Teilyzyklus ebenfalls eine relativ kompakte Doppel spitze (G6 (T), G7 (T)) im Gamma-Ray-Log, jedoch scheinen die beiden Tonmergelsteinlagen hier durch einen Anhydrit (S8 (A)), und nicht wie in den vorherigen Bohrungen durch eine Halitlage getrennt zu sein. Im oberen Abschnitt des Zyklus 4 ist ein mit ca. 4 m geringmächtiges, stark tonig verunreinigtes Steinsalzpaket (S9 (H)) ausgebildet. Darüber folgt ein Anhydrit, dem einzelne Mergelsteinlagen zwischengeschaltet sind. Insgesamt erreicht dieser vierte Zyklus eine Gesamtmächtigkeit von ca. 17 m. Gegenüber den bisher beschriebenen Bohrprofilen ist diese Mächtigkeit extrem gering.

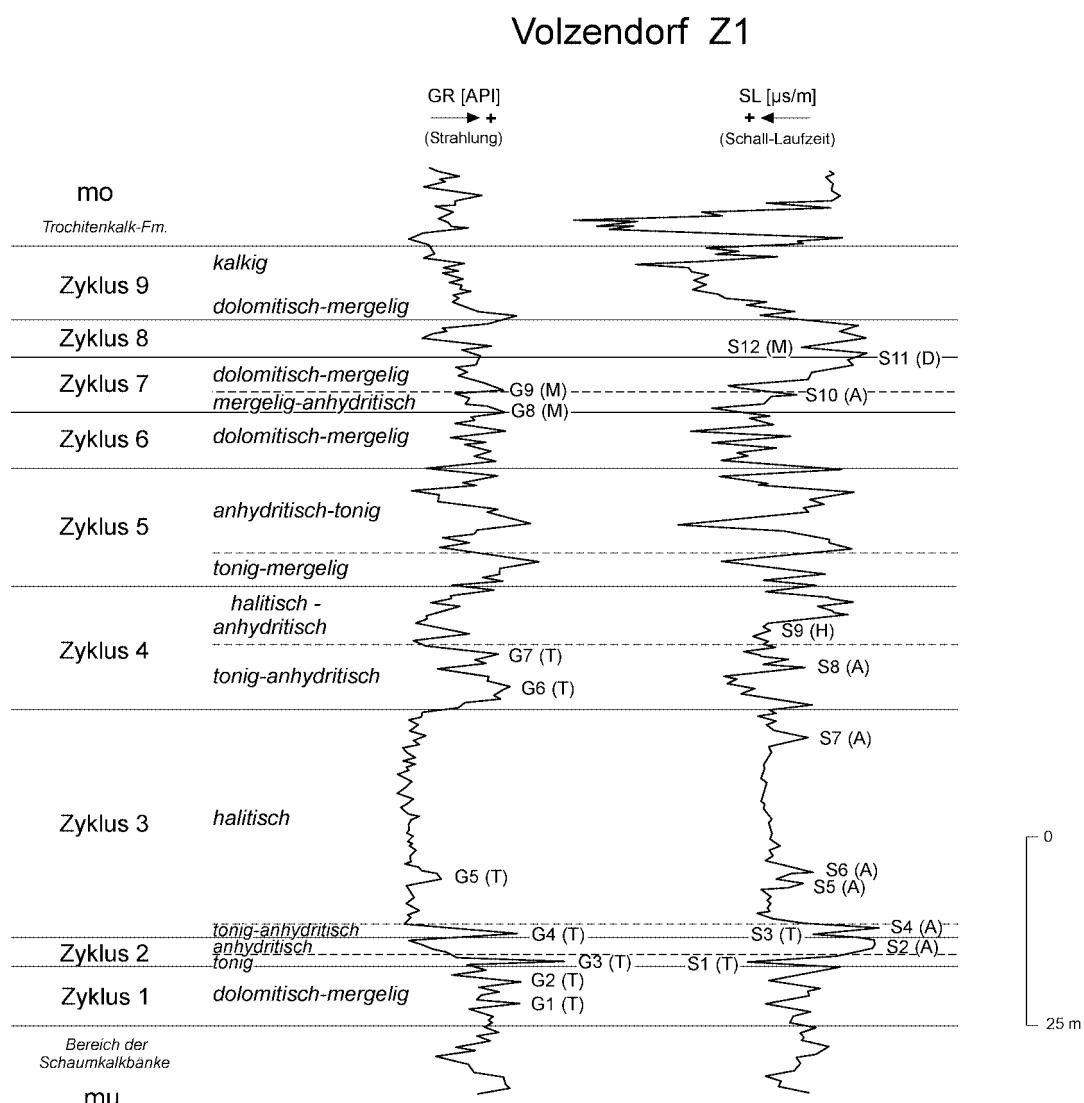


Abb. 46: Standardprofil des Mittleren Muschelkalks der östlichen Weser-Elbe-Region – Bohrung Volzendorf Z1, (Abkürzungen s. Abb. 14)

Der **Zyklus 5** besitzt eine dem Zyklus 4 ähnliche lithologische Ausbildung und Mächtigkeitsentwicklung (ca. 15 m), jedoch sind hier keine Halite mehr zur Ablagerung gekommen. Nach den geophysikalischen Bohrlochmessungen wechseltlagern deutlich erkennbar mächtige Anhydritpakete und Tonmergelsteine.

Eine enge Wechseltlagung von dolomitischen Mergelsteinen und Tonmergelsteinen kennzeichnet den **Zyklus 6**, der ca. 7 m mächtig wird.

Der **Zyklus 7** ist, ähnlich wie in der Bohrung Remlingen 7, gegenüber den beckenzentraler gelegenen Bohrungen in seiner Mächtigkeit deutlich erhöht. Charakteristisch für diesen ca. 7 m mächtigen Zyklus ist hier eine Abfolge von Dolomitmergel (G8 (M)) und Anhydrit (S10 (A)) im unteren Teil des Zyklus sowie Dolomitmergeln (G9 (M)) und Dolomiten (S11 (D)) im oberen Teil. Im oberen Abschnitt sind möglicherweise noch einzelne geringmächtige Anhydrite zwischengeschaltet, die in den Logs jedoch nicht eindeutig zu identifizieren sind.

Im **Zyklus 8** (ca. 5 m) überwiegt bereits die karbonatische Sedimentation. Das Logbild zeigt eine deutliche Zweiteilung in Dolomitmergel an der Basis (S12 (M)) und Dolomite, die eine deutliche Abnahme der Gammastrahlung und der Schall-Laufzeiten hervorrufen, im oberen Teil des Zyklus.

Der ca. 9,5 m mächtige **Zyklus 9** ist deutlich zweigeteilt. Während es im unteren dolomitisch-mergeligen Abschnitt des Zyklus nach oben hin zu einer deutlichen Zunahme der Schall-Laufzeiten kommt, ist der obere kalkige Abschnitt durch geringere Laufzeiten und Gammastrahlungswerte gekennzeichnet.

Die Grenze zum Oberen Muschelkalk ist wiederum durch das Einsetzen der Trochitenkalk-Fazies und dem damit verbundenen deutlichen Rückgang der Gammastrahlungswerte bzw. der Schall-Laufzeiten gut zu erkennen.

6.4.2.3 Südliche Weser-Elbe-Region

Standard-Profil:	Bohrung Hemmendorf Z1 (HMDF-Z1) , Abb. 47, 48, Anl. 9)
TK25:	3923, Blatt Hameln Süd
Regionaltektonische Einheit:	Sack-Scholle
Strukturelle Position:	NE der Hilsmulde
Mächtigkeit des mm:	72,5 m



Abb. 47: Geologischer Schnitt durch die Hils-Scholle (nach BALDSCHUHN et al. 1996). Der im geologischen Schnitt erkennbare Zechstein-Salzkeil liegt stratigraphisch im Niveau des Röt-Steinsalzes.

Profilbeschreibung:

In der Bohrung Hemmendorf Z1 wurde der Mittlere Muschelkalk sowohl oberhalb als auch unterhalb eines Zechsteinsalzkeils erbohrt. Als Standard-Profil wurde die vollständige, ungestörte Schichtenfolge oberhalb des Salzkeils ausgewählt.

Der Mittlere Muschelkalk beginnt oberhalb einer kompakten ca. 3 m mächtigen Karbonatbank. Vor allem im Sonic-Log hebt sich dieser Bereich (S1(K)) deutlich durch geringe Laufzeiten hervor, so dass der lithologische Wechsel von den Karbonaten des Unterlen zu den Dolomitmergelsteinen des Mittleren Muschelkalks in einem Anstieg der Gammastrahlung sowie der Laufzeiten zum Ausdruck kommt.

Der deutlich zweigeteilte **Zyklus 1** ist ca. 13,5 m mächtig und besteht aus Dolomiten und Dolomitmergeln, wobei der höhere Teil gegenüber dem unteren Abschnitt leicht erhöhte Gamma-Werte zeigt.

Die Basis des ca. 3 m mächtigen **Zyklus 2** wird von einer markanten Spitze im Gamma-Ray-Log gebildet (G1 (T)), die einem Tonmergelstein zugeordnet wird. Darüber folgt ein Anhydrit, im Sonic-Log als Spitze geringer Laufzeit (S2 (A)) deutlich erkennbar. Im oberen Teil ist ein mit etwa 2 m geringmächtiger Halithorizont ausgebildet.

Die Basis des **Zyklus 3** (ca. 5 m) wird ähnlich dem unterlagernden Zyklus von einem basalen Mergelstein (G2 (M)) und einem überlagernden Anhydrit (S3 (A)) gebildet, die im Log durch entsprechende Ausschläge gut zu identifizieren sind. Das darüber folgende Steinsalzpaquet wird ca. 4 m mächtig.

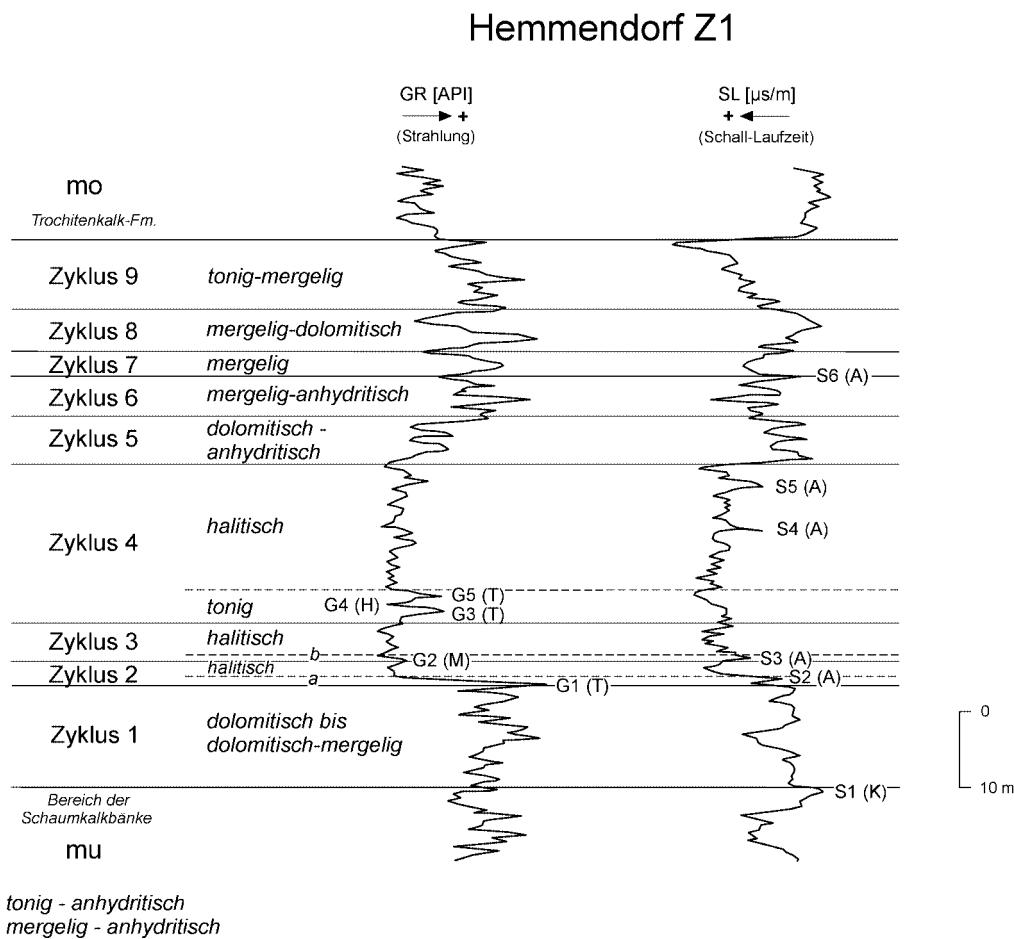


Abb. 48: Standardprofil des Mittleren Muschelkalks der südlichen Weser-Elbe-Region – Bohrung Hemmendorf Z1, (Abkürzungen s. Abb. 14)

Die Untergrenze des **Zyklus 4** (ca. 21 m) ist aufgrund einer markanten Doppelspitze im Gamma-Ray-Log ebenfalls gut zu erkennen. Der dieser basalen Doppelspitze (G3 (T), G5 (T)) entsprechende Abschnitt erreicht eine Mächtigkeit von ca. 4 m und besteht aus Tonsteinen, denen möglicherweise

entsprechend der Bohrung Remlingen 7 eine Steinsalzlage (G4 (H)) zwischengeschaltet ist. Abgeschlossen wird der Zyklus von einem ca. 16,5 m mächtigen Steinsalzpaket. Logspitzen geringer Laufzeit in der Sonic-Kurve (S4 (A), S5 (A)) weisen auf eine Verunreinigung des Salzlagers durch einzelne Anhydritlagen hin.

Der **Zyklus 5** setzt über dem Steinsalz des Zyklus 4 mit einem markanten Abfall in den Laufzeiten ein. Dieser Zyklus wird wie auch der **Zyklus 6** durch Wechsellagerungen von Dolomitmergelsteinen und Anhydrit geprägt. Die Mächtigkeiten der beiden Zyklen liegen jeweils bei ca. 6 m. Den Abschluss des 6. Zyklus bildet eine geringmächtige Anhydritlage (S6 (A)).

Der **Zyklus 7** ist wie auch in den zuvor beschriebenen Bohrungen anhand eines charakteristischen Logbildes gut abzugrenzen. Diesem Zyklus entspricht ein kompakter Ausschlag, der nach Gamma-Ray und Sonic-Log mit einem ca. 3 m mächtigen Mergelstein korrespondiert.

Mergel und Dolomite kennzeichnen den ca. 6 m mächtigen **Zyklus 8**. Im Logbild ist dieser Zyklus gegenüber dem Zyklus 7 durch einen Abfall der Schall-Laufzeiten gekennzeichnet, die jedoch zum Hangenden hin leicht ansteigt.

Der ca. 9 m mächtige **Zyklus 9** wird nach Spülproben von miteinander wechseltagernden Kalkmergelsteinen und Mergelsteinen aufgebaut, wobei der Wechseltagerungscharakter durch stark gezackte Kurven des Gamma-Ray- und Sonic-Logs deutlich erkennbar ist. Eine Zunahme der Schall-Laufzeiten im Sonic-Log zum Top des Zyklus hin wird durch steigende Mergelgehalte hervorgerufen.

Die Grenze zum Oberen Muschelkalk ist wiederum durch einen markanten Abfall in den Gamma-Ray- und Sonic-Log-Messkurven definiert, denn die kalkige Trochitenkalk-Formation des Oberen Muschelkalks hebt sich im Logbild gegenüber den unterlagernden kalkig-mergeligen Schichten des Mittleren Muschelkalks durch deutlich geringere Gammastrahlungs- sowie Laufzeitwerte ab.

6.4.3 Östliches Norddeutsches Becken

Standard-Profil: Bohrung **Fürstenwalde 3 (FSTW-3)**, Abb. 49, Anl. 9)

TK25: 3650, Blatt Fürstenwalde/Spree

Regionaltektonische Einheit: Mittenwalde-Scholle (BEUTLER 1995a)

Strukturelle Position: östlich Salzstruktur Spreenhagen

Mächtigkeit des mm: 74 m

Profilbeschreibung:

Die Bohrung Fürstenwalde 3 repräsentiert die halitfreie Faziesentwicklung des Mittleren Muschelkalks im östlichen Norddeutschen Becken.

Die Grenze Unterer/Mittlerer Muschelkalk ist im Gamma-Ray-Log durch einen Anstieg der Strahlungsintensitäten exakt zu fassen.

Der **Zyklus 1** erreicht eine Mächtigkeit von ca. 8 m. Während der untere Abschnitt in den Messkurven durch relativ gleichbleibende Gammastrahlung und auch Schall-Laufzeiten gekennzeichnet wird, ist für den oberen Abschnitt eine Zunahme dieser Parameter charakteristisch.

Mit einer deutlichen Einschnürung der Gamma-Ray- und Sonic-Log-Kurve, d.h. mit Logspitzen in Richtung höherer Werte (G1 (T), S1 (T)), beginnt der etwa 3 m mächtige **Zyklus 2**. Lithologisch wird dieser ca. 1,5 m mächtige untere Horizont einem Tonstein zugeordnet. Der obere Abschnitt des Zyklus ist dagegen anhydritisch ausgebildet (S2 (A)).

Der **Zyklus 3** zeigt eine dem Zyklus 2 ähnliche, mit ca. 3 m ebenfalls geringmächtige Abfolge. Über einer Tonmergelsteinspitze (G2 (T), S3 (T)) an der Basis des Zyklus folgt eine Anhydritspitze (S4 (A)).

Die Basis des ebenfalls halitfreien **Zyklus 4** hebt sich im Gamma-Ray-Log (G3 (M)) aufgrund seiner tonig-mergeligen Ausbildung deutlich von den unterlagernden Anhydriten ab. Der obere Abschnitt, der lithologisch durch Wechsellegerungen von Anhydriten und Mergelsteinen gekennzeichnet ist, zeigt aufgrund einzelner Anhydritspitzen (A) ein charakteristisches Logbild.

Der **Zyklus 5** (ca. 13,5 m) weist eine dem Zyklus 4 ähnliche Entwicklung auf. Im Gamma-Log beginnt dieser Zyklus mit einer relativ massigen, kompakten Gamma-Spitze höherer Intensität, die im Sonic-Log mit Logspitzen hoher Laufzeit (Tonmergelstein, S5 (T), S7 (T)) bzw. Logspitzen geringer Laufzeit (Mergel- bis Dolomitmergelstein, S6 (M)) korrespondieren. Der höhere Teil wird im Sonic-Log durch zwei Anhydritspitzen charakterisiert (S8 (A), S9 (A)).

Der ca. 9 m mächtige **Zyklus 6** zeigt im Logbild eine deutliche Zweiteilung, die besonders im Sonic-Log deutlich wird. Dabei werden die Logspitzen in Richtung höherer Laufzeit an der Basis dieses Zyklus Tonmergelsteinen, die Logspitzen in Richtung geringerer Laufzeit im oberen Teil des Zyklus Dolomitmergeln zugeordnet.

Der von Dolomitmergeln aufgebaute, ca. 6 m mächtige **Zyklus 7** ist durch eine relativ konstante Gammastrahlung gekennzeichnet, während die Schall-Laufzeiten nach oben hin zunehmen. Im höchsten Teil des Zyklus findet sich dort eine Spitze höherer Laufzeit, die einem Tonmergelstein zugeordnet wird.

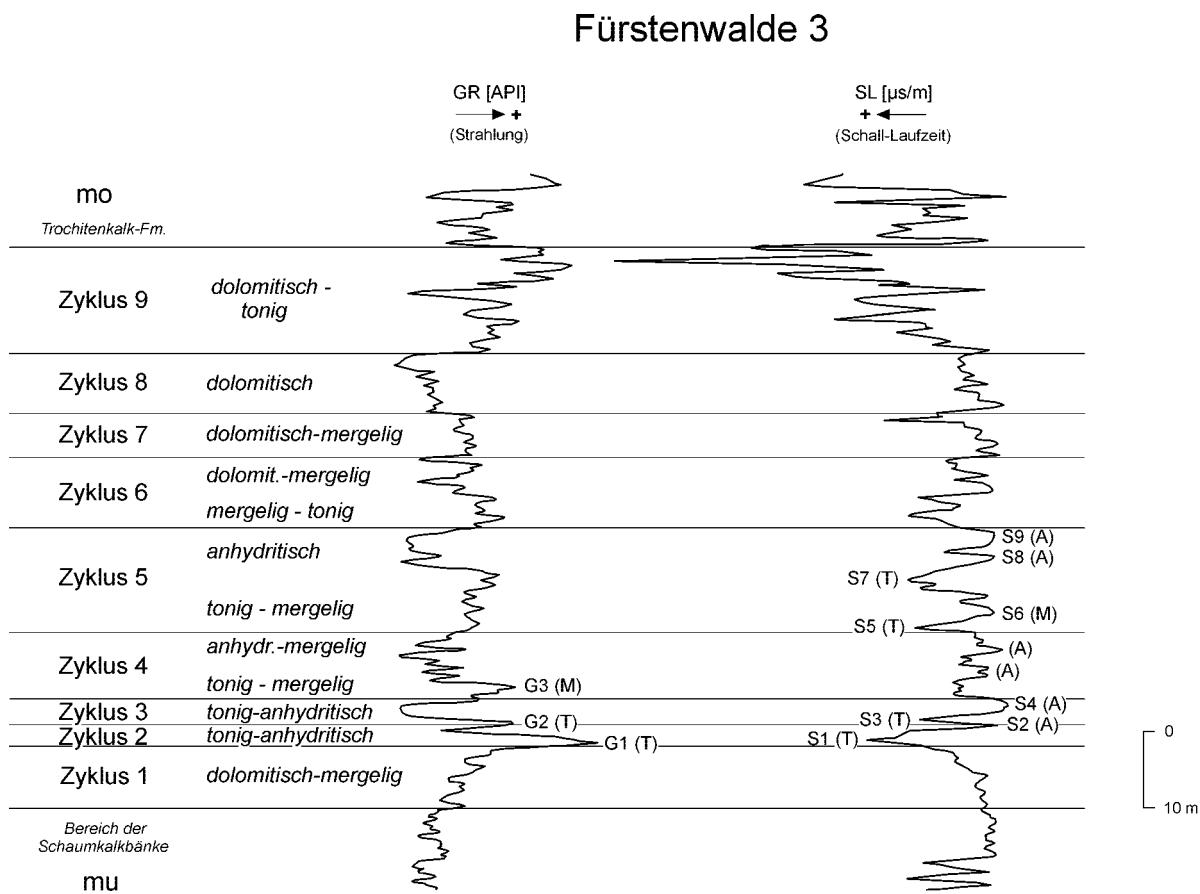


Abb. 49: Standardprofil des Mittleren Muschelkalks des östlichen Norddeutschen Beckens – Bohrung Fürstenwalde 3, (Abkürzungen s. Abb. 14)

Der **Zyklus 8** (ca. 8 m) zeichnet sich gegenüber dem Zyklus 7 durch deutlich geringere Gammastrahlung aus, ein Indiz für relativ kompakte Dolomite.

Ein sprunghafter Anstieg der Gammastrahlung markiert die Basis des **Zyklus 9**, wobei die Strahlung zum Hangenden kontinuierlich zunehmen. Damit verbunden ist im Sonic-Log ein Anstieg der Schall-Laufzeiten. Sowohl das Gamma-Ray- als auch das Sonic-Log zeigen in diesem Abschnitt ein deutliches Logpattern, was auf stark wechselnde Tongehalte der den Zyklus 9 aufbauenden Mergel- bis Dolomitmergelsteine hindeutet. Die Mächtigkeit des Zyklus 9 beträgt ca. 9 m.

Die Grenze zum Oberen Muschelkalk liegt wiederum in einem steilen Abfall der Gammastrahlung sowie der Schall-Laufzeiten.

6.4.4 Nördliches Norddeutsches Becken

Standard-Profil:	Bohrung Schwerin 1/87 (S-1/87) , Abb. 50, Anl. 12)
TK25:	2333, Blatt Gr. Brütz
Regionaltektonische Einheit:	Ostholstein-Westmecklenburg-Block
Strukturelle Position:	Salzkissen Gr. Welzin
Mächtigkeit des mm:	116 m

Profilbeschreibung:

In der Bohrung Schwerin 1/87 wird die Grenze Unterer/Mittlerer Muschelkalk im Gamma-Ray-Log in einen Anstieg der Strahlung, im Sonic-Log in einen ersten Anstieg der Schall-Laufzeiten gelegt.

Der den Mittleren Muschelkalk einleitende **Zyklus 1** erreicht eine Mächtigkeit von 7 m und zeigt eine deutliche Unterteilung in einen Bereich leicht erhöhter Gammastrahlung an der Basis und einen Bereich geringerer Gammastrahlung am Top des Zyklus, verursacht möglicherweise durch den Wechsel von Kalkmergelsteinen an der Basis zu Dolomitmergelsteinen am Top des Zyklus. Der **Zyklus 2** (ca. 7 m) zeigt im tieferen Teil eine deutliche Einschnürung sowohl des Gamma-Ray- (höhere Gammastrahlung, G1 (T)) als auch des Sonic-Logs (höhere Schall-Laufzeiten, S1 (T)), hervorgerufen durch mächtige Tonstein- bis Tonmergelsteine. Ein unruhiges Logpattern innerhalb dieses Zyklus wird durch Wechsellsagerungen dieser Gesteine mit Anhydrit verursacht. Für den oberen Abschnitt des Zyklus sind zwei Anhydritspitzen (S2 (A), S3 (A)) im Sonic-Log kennzeichnend.

Darüber folgt ein ca. 4 m mächtiger Tonmergelstein, der die Basis des **Zyklus 3** (26 m) bildet und dem im oberen Teil ebenfalls ein Anhydrit zwischengeschaltet ist. Den oberen Abschnitt des Zyklus 3 bildet ein ca. 22 m mächtiges Halitlager. Die Steinsalze zeigen ein relativ ruhiges Logbild ausgezeichnet und können somit als gering verunreinigt angesehen werden.

Der basale Abschnitt des **Zyklus 4** (7 m) wird, wie auch schon im Zyklus 3, von einem Mergelsteinpaket gebildet. Charakteristisch für diese Lithologie ist eine gegenüber den unterlagernden Salzen erhöhte Gammastrahlung und erhöhte Schall-Laufzeit. Die Steinsalze des Zyklus 4 werden in dieser Bohrung ca. 20 m mächtig.

Der ca. 16,5 m mächtige **Zyklus 5** zeichnet sich im Gamma-Ray-Log durch erhöhte Strahlungintensitäten aus. Während der basale Teil des Zyklus von Mergelsteinen mit eingeschalteten Anhydriten aufgebaut wird, dominieren im oberen Abschnitt Anhydrite. Zwei ca. 4 - 5 m mächtige Anhydritpakete, im Sonic-Log durch jeweils eine Doppel spitze (S4 (A), S6 (A)) mit Spitzen zu niedrigen Schall-Laufzeiten gekennzeichnet, werden durch einen ca. 2 m mächtigen Tonmergelstein, der im Sonic-Log durch eine markante Laufzeitspitze (S5 (T)) hin zu höherer Laufzeit hervortritt, getrennt. Die Anhydritdoppel spitzen ihrerseits werden ebenfalls durch in den Anhydrit eingeschaltete Mergelsteinlagen gegliedert.

Einen deutlich mergeligeren Charakter zeigen die **Zyklen 6 und 7** (ca. 9,5 m bzw. ca. 7,5 m). Gamma-Ray- und Sonic-Log zeigen in ihrem Kurvenverlauf jeweils höhere Werte. Einzelne Sonic-

Log-Spitzen hin zu geringer Schall-Laufzeit werden als Anhydritzwischenlagen (S7 (A), S8 (A), S9 (A)) gedeutet. Abgeschlossen werden die Zyklen 6 und 7 jeweils von einer Anhydritlage.

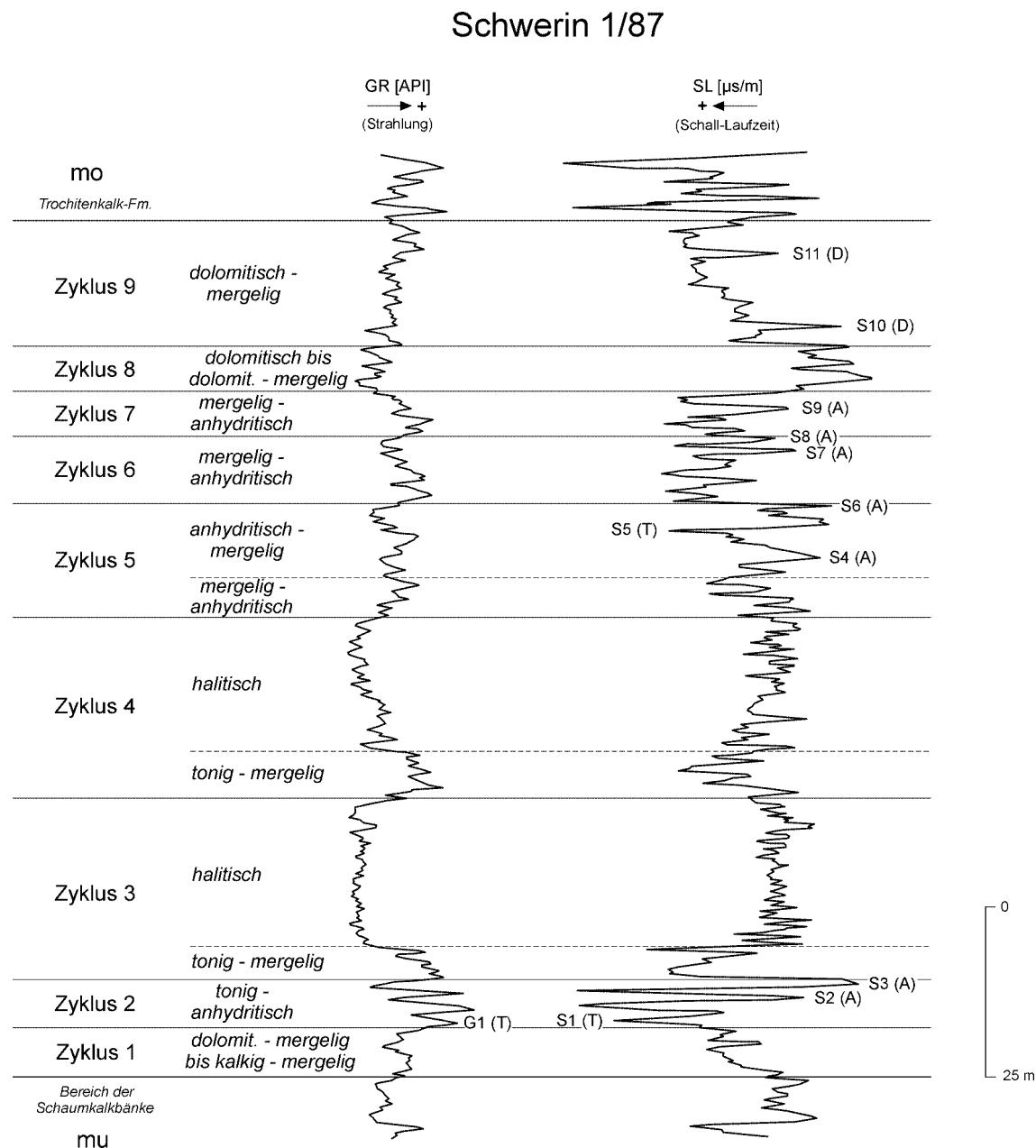


Abb. 50: Standardprofil des Mittleren Muschelkalks des nördlichen Norddeutschen Beckens – Bohrung Schwerin 1/87, (Abkürzungen s. Abb. 14)

Gegenüber den unterlagernden Zyklen ist der **Zyklus 8** durch eine deutliche Vorherrschaft an Dolomiten, denen Dolomitmergel zwischengeschaltet sind, gekennzeichnet. Gamma-Ray- und Sonic-Log zeigen eine markante Verlagerung der Messkurven zu jeweils geringeren Werten. Der Zyklus 8 erreicht eine Mächtigkeit von 6,5 m.

Im ca. 18 m mächtigen **Zyklus 9** ist eine kontinuierliche Zunahme sowohl der Gammastrahlung als auch der Schall-Laufzeiten zu beobachten. Zwei Spitzen geringerer Laufzeit belegen dolomitische Zwischenlagen (S9 (D), S10 (D)) in dem sonst mergeligen Schichtpaket.

Ein Rückgang der Gammastrahlung sowie ein markanter Abfall der Schall-Laufzeiten im Sonic-Log markieren wiederum die Grenze zum Oberen Muschelkalk.

6.5 Log-Korrelationsketten für den Mittleren Muschelkalk des Norddeutschen Beckens

Die Darstellung der regionalen lithologischen und feinstratigraphischen Entwicklung des Mittleren Muschelkalks erfolgt anhand von 6 Korrelationsketten (Abb. 6, Anl. 7 -12), die das gesamte Becken in West-Ost bzw. Nord-Süd-Richtung queren. Dargestellt sind für die einzelnen Bohrungen sowohl das Gamma-Ray als auch das Sonic-Log, denn die Kombination dieser beiden Bohrlochmessungen spiegelt in hervorragender Weise die lithologische Ausbildung der einzelnen Zyklen wider und erlaubt so eine sichere Korrelation der Zyklen.

Für paläogeographische und paläotektonische Aussagen erschien es von Bedeutung, die gesamte Schichtenfolge des Muschelkalks von der Oberkante des Oberen Buntsandsteins bis zur Untergrenze des Unterer Keupers in den Korrelationsketten darzustellen. Als Bezugsniveau für die Korrelationsketten wurde die Grenze Oberer Muschelkalk/Unterer Keuper sensu BEUTLER et al. (1992) gewählt. Danach wird im Norddeutschen Becken zur Grenzziehung zwischen Muschelkalk und Keuper die Basis des Unterer Lettenkohlsandsteins bzw. des Sandsteins S1 nach RICHTER (1936) herangezogen, an dessen Basis die Grenze Muschelkalk/Keuper definiert wird. In den geophysikalischen Bohrlochvermessungen hebt sich dieser Sandstein S1 als markante Bank ab, die im Gamma-Ray-Log durch eine deutliche Erniedrigung der natürlichen Radioaktivität zu erkennen ist, während sie im Sonic-Log durch einen markanten Anstieg der Laufzeiten gekennzeichnet ist (Abb. 52). Aufgrund seiner charakteristischen Logausbildung ist der Sandstein S1 anhand von Bohrlochmessungen im gesamten Becken korrelierbar.

Die Untergrenze des Sandsteins S1 markiert zudem in weiten Teilen des Norddeutschen Beckens eine ausgeprägte Erosionsdiskordanz (Diskordanz D1 sensu BEUTLER 1995b). In Schwellengebieten kann der Sandstein S1 z. T. bis auf den Trochitenkalk herunterschneiden (BEUTLER et al. 1992, BEUTLER 1995b).

Korrelationen und Grenzziehungen sind in den Muschelkalk- und Keuperprofilen des Norddeutschen Beckens aufgrund fehlender Bohrkerne meist nur anhand von geophysikalischen Bohrlochmessungen durchzuführen. Die Untergrenze dieses Sandsteins S1 erscheint aufgrund seiner guten Korrelierbarkeit für die Grenzziehung Muschelkalk/ Keuper prädestiniert.

6.5.1 Der Mittlere Muschelkalk in der Korrelationskette 1-1‘: Randzelgat Z1 - Remlingen 5 (Abb. 6, Anl. 7)

Die Korrelationskette 1-1‘quert das Norddeutsche Becken in NW-SE-Richtung. Dieser Profilschnitt verläuft aus dem Dollart südlich der Insel Borkum zunächst in östlicher und dann in südöstlicher Richtung. Paläogeographisch gesehen verläuft dieses Profil von der Niederländischen Schwelle (Bohrung Randzelgat Z1) im Westen über die Eichsfeld-Altmark-Schwelle bis an die Westflanke der Thüringen-Westbrandenburg-Senke im Osten (Bohrungen Remlingen 7 und 5).

Der Mittlere Muschelkalk weist im Verlauf dieser Korrelationskette extreme Mächtigkeitsvariationen von 88 - 524 m aus, die sowohl tektonisch als auch halokinetisch gesteuert sein können (S. 144ff.). Seine größte Mächtigkeit erreicht der Mittlere Muschelkalk in der Bohrung Westdorf 2A (524 m).

Im Vergleich zu den starken Unterschieden der Gesamtmächtigkeit des Mittleren Muschelkalks sind die des **Zyklus 1** mit 6 - 14 m nur relativ gering. Der Zyklus, der im gesamten Profilverlauf als mehr oder weniger toniger Dolomitmergelstein ausgebildet ist, setzt mit markanten Logspitzen in der

Gamma-Ray-Kurve und im Sonic-Log ein. Ein bedeutender Leithorizont ist der basale, durch eine hohe Gammastrahlung sowie hohe Schall-Laufzeiten gekennzeichnete Tonsteinhorizont des **Zyklus 2**, der eine erste markante „Einschnürung“ in der Logkombination von Gamma-Ray- und Sonic-Kurve hervorruft. Mit dem zweiten Zyklus beginnt in diesem Profil die vollsalinare Sedimentation, wobei Halitvorkommen in diesem Zyklus auf die zentralen Bereiche zwischen den Bohrungen Randzelgat Z1 im NW und Bornkamp Z1 im SE beschränkt sind. Die Halite erreichen Mächtigkeiten zwischen 4 bis 6 m. Eine Ausnahme bildet die Bohrung Westdorf 2A, in der das Steinsalzpacket des Zyklus 2 etwa 12 m mächtig wird. SE der Bohrung Bornkamp Z1 wird der Zyklus 2 dann vollständig von Tonmergelsteinen und Anhydriten vertreten. Jedoch können in einzelnen, lokalen Subsidenzzentren noch Halite abgelagert worden sein. So hat z. B. die Bohrung Oberg Z1 in diesem Zyklus geringmächtige Steinsalzlagen angetroffen. Dies wird besonders in der Kalibermessung dieser Bohrung deutlich, die im Bereich der im Zyklus 2 auftretenden Steinsalzlagen markante Bohrlochauskesselungen anzeigen (Abb. 51).

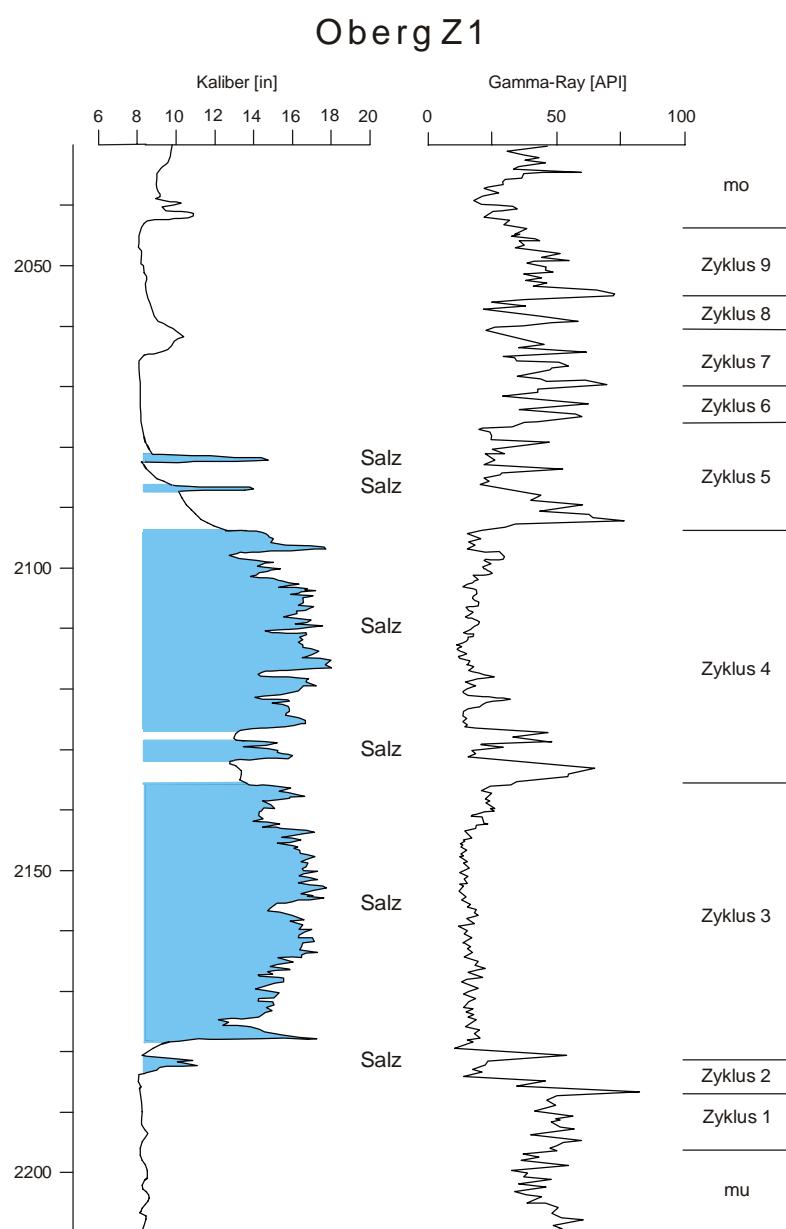


Abb. 51: Kalibermessung der Bohrung Oberg Z1, Bohrlochauskesselungen im Bereich der Steinsalzhorizonte

In den **Zyklen 3 und 4** sind in allen Bohrungen dieser Korrelationskette mächtige Steinsalzpakete enthalten, wobei der Zyklus 3 gegenüber dem Zyklus 4 die größeren Halitmächtigkeiten aufweist. Innerhalb des Zyklus 3 variieren die Steinsalzmächtigkeiten zwischen etwa 26 m in der Bohrung Suderbruch T1 und etwa 47 m in der Bohrung Krusenhausen Z1. Die deutlich geringmächtigere Ausbildung des Zyklus 3 in der Bohrung Remlingen 7 mit lediglich 6 m Steinsalz spiegelt die paläogeographische Position dieser Bohrung im Bereich der Ostabdachung der synsedimentär wirksamen Eichsfeld-Altmark-Schwelle wider. Innerhalb dieses Zyklus wurde ein ca. 1,5 m mächtiger, brekziierter Anhydrit erbohrt, der als laterales Äquivalent von Salzablagerungen des Zyklus 3 des Beckenzentrums anzusehen ist und auf laterale Lösungsvorgänge der Salzhorizonte zurückgeführt wird. Danach entspricht diesem Anhydrit ein ca. 30 - 45 m mächtiger Salzhorizont im Beckenzentrum, wie er z. B. in der Bohrung Oberg Z1 (ca. 42 m) nachgewiesen werden konnte. Ähnliches konnten ANDERSON et al. (1972) sowie DEAN & ANDERSON (1982) in den permischen Castille Evaporiten des Delaware Basins aufzeigen.

Im **Zyklus 4** werden Steinsalzmächtigkeiten von 19 m in der Bohrung Suderbruch T1 und 36 m in der Bohrung Bornkamp Z1 erreicht. Die basalen Anhydrit/Tonstein-dominierten Bereiche erreichen Mächtigkeiten von etwa 2 - 9 m. Die höchsten Mächtigkeiten für den Zyklus 4 sind in den Bohrungen Westdorf 2A und Wurzeldeich Z1 zu beobachten, was auf die paläogeographische Lage dieser Bohrungen im Bereich der z.Zt. des Mittleren Muschelkalks synsedimentär aktiven Westdorf-Scholle („Graben“) zurückzuführen ist.

Der **Zyklus 5** zeigt im Verlauf dieser Korrelationskette eine deutliche regionale Zweiteilung seiner Mächtigkeit. Während er im Profilabschnitt von der Bohrung Randzelgat Z1 im NW bis zur Bohrung Kassebruch T2, im Bereich der östlichen Ostfriesland-Scholle, mit 20 - 30 m noch relativ mächtig ist, ist im südöstlichen Profilabschnitt zwischen den Bohrungen Bornkamp Z1 und Oberg Z1 ein deutlich geringmächtiger Zyklus 5 erbohrt worden. Dies ist auf eine Abnahme der Steinsalzmächtigkeiten im oberen Abschnitts des Zyklus zurückzuführen. In diesem stratigraphischen Niveau treten im Gamma-Ray-Log der Profile zwei Tonsteinspitzen markant hervor, die das geringmächtige niedrigstrahlende nordwestlichen Salzpalet zusammen mit Anhydritlagen (Spitzen im Sonic-Log) deutlich untergliedern. Auch in den Bohrungen des nordwestlichen Abschnitts sind diese beiden Tonsteinspitzen zu erkennen, die einem ansonsten sehr kompakten geringstrahlenden Steinsalzpalet zwischengeschaltet sind. Einen recht einheitlichen Aufbau zeigen die **Zyklen 6 - 9**. Lediglich in den im SE-Teil der Korrelationskette gelegenen Bohrungen Oberg T1 bis Remlingen 7 treten im **Zyklus 7** geringe Mächtigkeitserhöhungen auf. Diese werden auf zwischengeschaltete Anhydritlagen zurückgeführt. Eine gegenüber dem südöstlichen Teilabschnitt der Korrelationskette stärkere Subsidenz verursacht im Nordwesten höhere Mächtigkeiten im **Zyklus 9**. Die Grenze zur Trochitenkalk-Formation ist in der gesamten Korrelationskette durch einen steilen Abfall der Schall-Laufzeiten im Sonic-Log markiert.

Eine Sonderstellung nehmen, wie bereits oben erwähnt, die Bohrungen Westdorf 2A und Wurzeldeich Z1 ein. Beide Bohrungen zeichnen sich durch extreme Mächtigkeiten aus. Während der Zyklus 1 mit 12 m in der Bohrung Wurzeldeich Z1 und 14 m in der Bohrung Westdorf 2A noch eine für diesen Zyklus 1 typische Mächtigkeitsentwicklung aufweist, zeigen alle weiteren Zyklen markante Mächtigkeitszunahmen. Während alle anderen Bohrungen dieser Korrelationskette nur in den Zyklen 2 bis 5 Steinsalze enthalten, sind in den Bohrungen Wurzeldeich Z1 und Westdorf 2A zusätzliche Steinsalzpakete innerhalb der Zyklen 6 und 7 zur Ablagerung gekommen. Die Halite des Zyklus 6 erreichen in der Bohrung Wurzeldeich Z1 ca. 21 m, in der Bohrung Westdorf 2A sogar ca. 59 m. Im Zyklus 7 der Bohrung Wurzeldeich Z1 wurden dagegen lediglich ca. 4 m Steinsalz angetroffen, während dieses Salzpalet in der Bohrung Westdorf 2A ca. 63 m mächtig ist. Eine extrem hohe Mächtigkeit von ca. 83 m kennzeichnet den halitfreien Zyklus 9 der Bohrung Westdorf 2A.

Ursache für diese stark abweichende Entwicklung des Mittleren Muschelkalks im Norddeutschen Becken ist die strukturelle Position der Bohrungen Wurzeldeich Z1 und Westdorf 2A im Bereich

des synsedimentär aktiven Westdorf-Grabens als Teil eines komplexen Horst-/Grabensystem in der südlichen Verlängerung des Horn-Grabens.

6.5.2 Der Mittlere Muschelkalk in der Korrelationskette 2-2': Worth Z1 - Gramzow Z1 (Abb. 6, Anl. 8)

Die Korrelationskette 2-2' verläuft in W-E-Richtung durch das Norddeutsche Becken und ist mit ihrem westlichen Endpunkt, der Bohrung Worth Z1, an die Korrelationskette 1 angebunden. Ihren östlichen Endpunkt hat sie in der Bohrung Gramzow 1/87. Paläogeographisch gesehen beginnt die Korrelationskette 2-2' im Bereich des Weser-Leine-Troges (Bohrung Worth Z1), quert die Eichsfeld-Altmärk-Schwelle, die Thüringisch-Westbrandenburg-Senke und endet im Bereich der Ostbrandenburg-Schwelle. Der Mittlere Muschelkalk erreicht Mächtigkeiten zwischen 77 m in der Bohrung Gramzow 1/87 und etwa 154 m in der Bohrung Ebstorf Z1.

Die Basis des Mittleren Muschelkalks ist in den Bohrlochmessungen der hier dargestellten Bohrungen durch einen deutlichen Anstieg der Gammastrahlung charakterisiert. Der **Zyklus 1** weist ähnlich der Korrelationskette 1-1' nur geringfügige Mächtigkeitsschwankungen zwischen 6 und 14 m auf. Ursache der erhöhten Gammastrahlung im Basisbereich des Zyklus 1 ist eine Zunahme des Tonmergelgehaltes in diesem Schichtabschnitt. Im oberen Teil des Zyklus weisen einzelne Laufzeit-Spitzen geringerer Laufzeit auf Anhydrit-Einschaltungen innerhalb der hier auftretenden Dolomitmergelsteine hin.

Der **Zyklus 2** beginnt in charakteristischer Weise mit einer Einschnürung von Gamma-Ray-Kurve (hohe Strahlung) und Sonic-Log (hohe Laufzeit), Indiz für Dolomitmergel bis tonige Mergel im basalen Teil des Zyklus. Der Zyklus 2 ist mit 3 - 11 m deutlich geringmächtiger ausgebildet als in der Korrelationskette 1-1'. Dies ist vor allem auf das Fehlen bzw. die nur sehr geringmächtige Ausbildung von Haliten in diesem Zyklus zurückzuführen. Lediglich in den westlichen Bohrungen Wietzendorf Z3 (Mächtigkeit des Zyklus 2: 11 m), Worth Z1 (6 m) sowie Uelzen Z1 (6 m) lassen sich geringmächtige Halithorizonte (2 - 7 m) nachweisen. In diesen Bohrungen ist der Zyklus 2 als idealer salinarer Kleinzyklus entwic?kelt, mit Dolomitmergel- bis Mergelsteinen an der Basis, darüberlagernden Anhydriten und Haliten im höchsten Teil des Zyklus. Fehlen die Halite innerhalb dieses Zyklus, wie es für den östlichen Teilabschnitt dieser Korrelationskette aufgezeigt werden konnte, so besteht dieser dann geringmächtigere Zyklus aus einem dolomitisch-mergeligen Fuß und einem anhydritischen höheren Teil. Die gegenüber den Mergel-/Tonmergelsteinen und auch Steinsalzen durch deutlich geringere Laufzeiten gekennzeichneten Anhydrite bilden dabei im Sonic-Log markante Logspitzen.

Gegenüber dem Zyklus 2 sind die Zyklen 3 und 4 durch mächtigere saline Abfolgen gekennzeichnet. Die Basis des **Zyklus 3** zeigt stets eine einheitliche Ausbildung und Mächtigkeit. Charakteristisch ist ein ca. 1 m mächtiger dolomitischer Mergelstein an der Basis, der sich in allen Bohrungen durch eine deutliche Spitze im Gamma-Ray- sowie im Sonic-Log hervorhebt. Darüber folgt ein ebenfalls geringmächtiger Anhydrit (Spitze geringerer Laufzeit). Den oberen Bereich des Zyklus 3 bilden wie auch im Zyklus 4 mächtige Halithorizonte. Im Bereich dieser Halitlager auftretende Logspitzen in der Sonic-Kurve bzw. untergeordnet auch in der Gamma-Ray-Kurve weisen auf anhydritische bzw. tonig-mergelige Verunreinigungen hin.

Eine markante Doppelspitze im Gamma-Ray-Log markiert in allen Bohrungen den Basisbereich des **Zyklus 4**. Lithologisch besteht dieser ca. 4 - 11 m mächtige Abschnitt aus zwei durch Steinsalz getrennte Ton- bis Tonmergelsteinbänken, die deutlich anhydritisch ausgebildet sind.

Steinsalzpakete mit Mächtigkeiten bis zu 51 m im Zyklus 3 (Bohrung Ebstorf Z1) sowie bis zu 28 m im Zyklus 4 (Bohrung Uelzen Z1) lassen sich vor allem westlich der Bohrung Volzendorf Z1 nachweisen. Während diese Bohrung auf der Nordaltermärk-Scholle und damit im Einflussbereich der Ostflanke der Eichsfeld-Altmärk-Schwelle liegt, gehören die Bohrungen Uelzen Z1 und Ebstorf Z1 dem

Weser-Leine-Trog an. Östlich der Bohrung Volzendorf Z1, in der die Halite im Zyklus 3 ca. 29 m, im Zyklus 4 lediglich ca. 4 m mächtig sind, tritt Steinsalz innerhalb der Zyklen 3 und 4 nur noch in einzelnen, lokalen Subsidenzzentren auf. So wurden in den Bohrungen Zehdenick 2/75 und Feldberg 1/87 im Zyklus 3 Steinsalze in Mächtigkeiten von ca. 17 m bzw. 3 m angetroffen, während im Zyklus 4 die Bohrung Zehdenick 2/75 ein ca. 20 m mächtiges Steinsalzlager erbohrte.

Der **Zyklus 5** besitzt eine relativ einheitliche Mächtigkeit von ca. 15 m, was auf das fast völlige Fehlen von Steinsalz im oberen Abschnitt zurückzuführen ist. Lediglich in den zwei am westlichsten gelegenen Bohrungen Worth Z1 und Wietzendorf Z3 bis zu 2 m mächtige Steinsalzlager nachzuweisen. Die Basis wird durch einen anhydritisch-mergeligen Fuß charakterisiert, der in allen Bohrungen dieser Korrelationskette aufgrund eines relativ kompakten Ausschlags im Gamma-Ray einen guten Leithorizont bildet. Der obere Abschnitt lässt sich ebenfalls sehr gut verfolgen, typisch sind 2 - 3 Anhydritspitzen im Sonic-Log. In der Bohrung Zehdenick 2/75 wird dieser anhydritbetonte obere Abschnitt mächtiger, der Zyklus 5 erreicht hier eine Gesamtmächtigkeit von ca. 25 m.

Wie auch in der Korrelationskette 1-1' zeigen die **Zyklen 6 - 8** eine relativ einheitliche Ausbildung und Mächtigkeitsentwicklung. Charakteristisch sind Wechsellsagerungen von Dolomit-/Dolomitmergelsteinen und Anhydriten, wobei dieser enge lithologische Wechsel zu einem unruhigeren, jedoch markanten und daher gut verfolgbaren Logbild führt.

Im **Zyklus 9** dominiert eine mergelig-dolomitische Sedimentation. Dieser Abschnitt ist durch eine kontinuierliche Zunahme der Laufzeiten zum Hangenden hin gekennzeichnet, was auf eine Zunahme des Mergelgehalts hinweist. In den Bohrungen Zehdenick 2/75 und Feldberg 1/87 belegen geringe Schall-Laufzeiten dagegen auf eine stärker karbonatische Abfolge. In einzelnen Bohrungen, wie z. B. den Bohrungen Ebstorf Z1, Braudel Z1 und Volzendorf Z1, sind die obersten Meter des Mittleren Muschelkalks gegenüber dem tieferen Teil durch deutlich geringere Laufzeiten gekennzeichnet, ein Anzeichen für das Vorhandensein von Kalksteinbänken.

Die Grenze zum Oberen Muschelkalk liegt wiederum in einem steilen Abfall der Schall-Laufzeiten, der in der gesamten Korrelationskette gut zu erkennen ist. Die Trochitenkalk-Formation ist meist als ein kompaktes Kalksteinpaket ausgebildet, das durch Tonmergelsteineinschaltungen (Logspitzen im Gamma-Ray- und Sonic-Log) untergliedert wird.

In der Korrelationskette 2-2' weist die Bohrung Volzendorf Z1 mit ca. 103 m für den Mittleren Muschelkalk eine gegenüber den weiter westlich gelegenen Bohrungen Uelzen Z1 (150 m) oder Ebstorf Z1 (154 m) deutlich geringere Gesamtmächtigkeit auf. Während letztere im Bereich des Weser-Leine-Troges abgeteuft wurden, liegt die Bohrung Volzendorf Z1 im Bereich der Eichsfeld-Altmark-Schwelle. Auch die am Ostrand des Norddeutschen Beckens abgeteufte Bohrung Gramzow 2/87 weist eine geringe Gesamtmächtigkeit von 77 m auf. Hier macht sich die Ostbrandenburg-Schwelle deutlich bemerkbar. Dagegen, hat die Bohrung Zehdenick 2/75 mit 136 m eine für ihre paläogeographische Position (östliches Norddeutsches Becken) deutlich höhere Mächtigkeit angetroffen. Ursache ist eine lokal erhöhte Subsidenz, bedingt durch die Anlage einer primären Randsenke des Salzkissens Kleinmutz zur Zeit des Muschelkalks.

6.5.3 Der Mittlere Muschelkalk in der Korrelationskette 3-3': Hemmendorf Z1 - Fürstenwalde 3 (Abb. 6, Anl. 9)

Die Korrelationskette 3-3' quert das Norddeutsche Becken aus südlich-beckenrandlicher Position in SW-NE-Richtung. Ausgangspunkt ist die Bohrung Hemmendorf Z1, die im südlichen Niedersachsen im Bereich der Hils-Scholle abgeteuft wurde. Danach quert diese Korrelationskette u. a. die Hildesheimer Wald-Scholle (Bohrung Almstedt 1), die Elm-Scholle (Bohrung Remlingen 7) und endet am östlichen Beckenrand mit der Bohrung Fürstenwalde 3. Paläogeographisch gesehen repräsentieren

die Bohrungen die Strukturelemente Weser-Leine-Trog, Eichsfeld-Altmark-Schwelle sowie die Ostbrandenburg-Schwelle.

Die Schichtenfolge des Mittleren Muschelkalks erreicht in den Bohrungen dieser Korrelationskette Gesamtmächtigkeiten von etwa 70 - 90 m. Lediglich in der Bohrung Eldagsen Z1 wird eine dem Beckentrend (Weser-Leine-Trog) folgende höhere Mächtigkeit von ca. 129 m erreicht. Ein besonders geringmächtiges Profil hat die Bohrung Elze-West Z1 mit nur etwa 50 m erbohrt. Diese sehr geringe Mächtigkeit wird zum einen auf das sekundäre, durch Subrosion bedingte Fehlen von Steinsalzhorizonten zurückgeführt, zum anderen aber auch auf eine alle Zyklen gleichermaßen betreffende relative Mächtigkeitsabnahme.

Lediglich der **Zyklus 1** ist in allen Bohrungen durch eine relativ konstante Mächtigkeit von durchschnittlich 10 - 15 m gekennzeichnet. Die geringste Mächtigkeit wurde in der Bohrung Remlingen 7 mit ca. 6 m angetroffen, die höchste in der Bohrung Berlin 3, wo dieser Kleinzyklus ca. 20 m erreicht. Damit entspricht die in der Bohrung Berlin 3 erbohrte Mächtigkeit dem in der zentralen Beckenachse festgestellten Mächtigkeitstrend.

Der **Zyklus 2** zeigt auch hier wieder seine charakteristische Ausbildung, beginnend mit einer basalen Tonmergelsteinspitze im Gamma-Ray- bzw. im Sonic-Log. Darüber folgt eine Anhydritspitze im Sonic-Log. In der Bohrung Eldagsen Z1 erreicht der Zyklus in dieser Korrelationskette mit etwa 6 m seine größte Mächtigkeit. Sowohl in dieser Bohrung als auch in den unweit davon abgeteuften Bohrungen Hemmendorf Z1 und Alfeld-Elze Z7 sind geringmächtige Halite im höheren Teil dieses Zyklus eingeschaltet. Östlich davon konnten in den Logs keine Steinsalze mehr nachgewiesen werden.

Steinsalzhorizonte wurden in den Zyklen 3 und 4 nur in den Bohrungen Hemmendorf Z1, Eldagsen Z 1 und Remlingen 7 nachgewiesen, wobei in der Bohrung Almstedt 1 am Bohrkern Residualbrekzien dokumentiert werden konnten, die ehemals vorhandene Steinsalze innerhalb der Zyklen 3 und 4 belegen. In den Bohrungen Elze-West Z1, Alfeld-Elze Z7, Hildesheimer Wald Z1 und Hohenassel Z1 wurde der Top des Mittleren Muschelkalks in Teufenlagen zwischen 86 m (Bohrung Hohenassel Z1) und 152 m (Bohrung Hildesheimer Wald Z1) erbohrt, so dass das Fehlen von Steinsalz, wie auch in der Bohrung Almstedt 1, auf Subrosion der Salinarbildungen zurückgeführt wird. In den Bohrungen im östlichen Teil der Korrelationskette (Berlin 3, Wriezen 3/88, Fürstenwalde 3) finden sich ebenfalls keine Anzeichen auf eine Steinsalzführung. Hier wird jedoch davon ausgegangen, dass in diesem Bereich des Muschelkalkbeckens Steinsalze primär nicht gebildet wurden.

Das Steinsalzpaket des **Zyklus 3** ist in der Bohrung Eldagsen Z1 entsprechend dem allgemeinen Trend gegenüber dem des Zyklus 4 am mächtigsten entwickelt. Dagegen ist in der Bohrung Hemmendorf Z1 das Steinsalzlager innerhalb des Zyklus 3 mit nur 4 m deutlich geringmächtiger als das des Zyklus 4 (ca. 17 m). Mögliche Ursache hierfür ist eine sehr wahrscheinlich bereits synsedimentäre Ablaugung von Steinsalz des Zyklus 3, wie dies auch für die Bohrung Remlingen 7 gezeigt werden konnte. Bei fehlender Steinsalzführung wie z. B. in den Bohrungen des Ostteils dieser Korrelationskette werden die Zyklen 3 und 4 von Mergelsteinen an der Basis sowie kompakteren Anhydritlagen im höheren Teil gebildet. Die Mächtigkeiten der einzelnen Zyklen sind bei dieser lithologischen Ausbildung in den dargestellten Bohrungen mit etwa 4 bis 13 m für den Zyklus 3 und etwa 9 -13 m für den Zyklus 4 deutlich geringer.

Für den **Zyklus 5** ist ein tonig-mergeliger Fuß mit deutlichen Logspitzen in der Gamma-Ray- und Sonic-Kurve charakteristisch. Im östlichen Teil der Korrelationskette, in den Bohrungen Berlin 3, Wriezen 3/88 und Fürstenwalde 3, ist dieser Abschnitt deutlich karbonatischer entwickelt. Der höhere Teil des Zyklus wird vorwiegend von Anhydritten und Dolomitmergelsteinen aufgebaut, wobei zum Hangenden hin eine deutliche Mächtigkeitszunahme der einzelnen Anhydritlagen zu beobachten ist. Der oberste, relativ kompakte Anhydrit kann bis zu 3 m mächtig werden. Lediglich in der Bohrung Eldagsen Z1 ist oberhalb des basalen Abschnitts noch ein ca. 2 m mächtiger Steinsalzhorizont anzunehmen, der im Hangenden von einem relativ kompakten Anhydrit abgelöst wird. Das in der Boh-

rung Remlingen 7 angetroffene Steinsalz (rotes Fasersalz) ist als sekundäre, störungsbedingte Bildung anzusehen.

Die **Zyklen 6 - 8** zeigen aufgrund der für sie typischen Wechsellagerungen von Dolomitmergelsteinen und Anhydriten ein deutlich unruhigeres Logbild mit markanten Logspitzen im Gamma-Ray- und Sonic-Log. Die Gesamtmächtigkeiten dieses Abschnittes schwanken zwischen ca. 12 m in der Bohrung Elze-West Z1 und etwa 25 m in der Bohrung Remlingen 7. Gegenüber den liegenden Zyklen 6 und 7 zeichnet sich der Zyklus 8 durch einen z. T. deutlichen Rückgang des Mergelstein- und Anhydritanteils zugunsten karbonatischer Gesteine aus, erkennbar an einer geringeren Gammastrahlung verbunden mit geringen Schall-Laufzeiten.

Die Basis des **Zyklus 9** ist gut korrelierbar und wird durch einen Anstieg der Gammastrahlung sowie der Laufzeiten markiert. Innerhalb des Zyklus 9 nimmt der Mergelgehalt mehr oder weniger deutlich zu, im Sonic-Log dokumentiert durch ein kontinuierliches Ansteigen der Schall-Laufzeit.

Wie auch in den Korrelationsketten 1-1' und 2-2' gezeigt werden konnte, setzt der Obere Muschelkalk im Sonic-Log mit einem markanten Rückgang der Schall-Laufzeiten ein. Da die Bohrung Hohenassel Z1 im Oberen Muschelkalk ansetzt, sind aus technischen Gründen die obersten Meter bohrlochgeophysikalisch nicht vermessen. In der Bohrung Alfeld-Elze Z1 wird dagegen der Obere Muschelkalk transgressiv von tertiären Schichten überlagert. Auch hier ist der höhere Profilabschnitt geophysikalisch nicht vermessen. Ebenfalls nicht vermessen ist in der Bohrung Almstedt 1 der Grenzbereich Oberer Muschelkalk/Unterer Keuper.

6.5.4 Der Mittlere Muschelkalk in der Korrelationskette 4-4': Kassebruch T2 - Fürstenau Z1 (Abb. 6, Anl. 10)

Die Korrelationskette 4-4' quert das westliche Norddeutsche Becken in NE-SW Richtung. Ausgangspunkt ist die auf der Korrelationskette 1-1' gelegene Bohrung Kassebruch T2, die paläogeographisch gesehen im Bereich der zentralen Beckenachse abgeteuft worden ist. Endpunkt ist die Bohrung Fürstenau Z1, die paläogeographisch der Hunte-Schwelle angehört. Die Gesamtmächtigkeiten des Mittleren Muschelkalks variieren in diesem Teil des Norddeutschen Beckens zwischen ca. 161 m in der Bohrung Kassebruch T2 und etwa 46 m in der Bohrung Fürstenau Z1. Insgesamt ist eine kontinuierliche Abnahme der Mächtigkeiten von Norden nach Süden festzustellen. Dagegen schwankt die Mächtigkeit für den gesamten Muschelkalk nur geringfügig. Besonders deutlich zeigt sich dieser Sachverhalt beim Vergleich der Bohrungen Hemmelte Z4 und Fürstenau Z1. Liegt die Gesamtmächtigkeit des Muschelkalks in der Bohrung Fürstenau Z1 bei etwa 219 m und in der Bohrung Hemmelte Z4 bei etwa 231 m, so sind für den Mittleren Muschelkalk Mächtigkeiten von ca. 46 m (Fürstenau Z1) bzw. ca. 94 m (Hemmelte Z4) erbohrt worden. Hier spiegelt sich deutlich der unterschiedliche Einfluss der jeweils paläogeographisch wirksamen Strukturen wieder. Während die Bohrung Fürstenau Z1 im Unterem Muschelkalk (ca. 125 m) noch im Bereich der Ems-Senke liegt, macht sich in der Bohrung Hemmelte Z4 bei einer deutlich verringerten Mächtigkeit von etwa 100 m bereits der Einfluss der Hunte-Schwelle bemerkbar. Nach ROSENFELD & THIELE (1992) zeigt der Verlauf der 100 m-Isopache im mittleren und östlichen Osning südwestlich von Detmold in etwa den Nordostrand der Rheinischen Masse an. Im Mittleren Muschelkalk vergrößert sich dann der Einfluss der Hunte-Schwelle deutlich nach Westen, dokumentiert durch das in der Bohrung Fürstenau Z1 erbohrte geringmächtige Schichtpaket des Mittleren Muschelkalks. Nach Norden macht sich der Einfluss der Hunte-Schwelle zu dieser Zeit weniger stark bemerkbar als zur Zeit des Unterem Muschelkalks, denn die Bohrung Hemmelte Z4 weist mit rund 94 m noch relativ hohe Mächtigkeiten auf. Zeitlich lässt sich die Vergrößerung des Einflussbereichs der Hunte-Schwelle in der Bohrung Fürstenau Z1 relativ gut fassen. Während der **Zyklus 1** mit 7 m wie in den Bohrungen Hude Z1 bis Hemmelte Z4 (jeweils 6 m) eine für diese Korrelationskette typische Mächtigkeit aufweist, sind die Zyklen 2 - 9 durch deutlich geringere Mächtigkeiten charakterisiert.

Der **Zyklus 2** beginnt in den Bohrungen mit einem dolomitisch-mergeligen Fuß, der von einem Anhydrit, erkennbar an einer Spitze im Sonic-Log, überlagert wird. Dieser basale Abschnitt wird etwa 2 bis 4 m mächtig. Darüber folgen die ersten Steinsalzablagerungen (5 - 10 m). Lediglich in der Bohrung Hude Z1 (lokales Hochgebiet) und der Bohrung Fürstenau Z1 (Einfluss der Hunte-Schwelle, s. o.) fehlt dieses erste Salz. Dort ist der obere Abschnitt geringmächtiger und besteht vor allem aus Anhydrit.

Der **Zyklus 3** zeigt mit Ausnahme der Bohrung Fürstenau Z1 eine sehr einheitliche Mächtigkeit von etwa 35 - 38 m. Der basale Bereich wird wiederum von Tonmergelsteinen aufgebaut, gefolgt von einem Anhydrit. Dieses Schichtpaket weist charakteristische Spitzen im Gamma-Ray- und Sonic-Log auf und ist so aufgrund seines Logbildes deutlich von den unter- und überlagernden Steinsalzpaketen abzugrenzen. Die Steinsalze des Zyklus 3 zeigen sowohl im Gamma-Ray- als auch des Sonic-Logs nur äußerst geringfügige Schwankungen. Dies spricht für einen nur geringen Verunreinigungsgrad des Steinsalzlagers.

Die Basis des **Zyklus 4** ist durch eine markante Doppelspitze im Gamma-Ray-Log gekennzeichnet, hervorgerufen von einem Ton- Tonmergelsteinhorizont mit zwischengeschalteten und etwa 1 - 2 m mächtigen Steinsalzlagern. Im höheren Teil dieses Abschnittes ist z. T. Anhydrit eingeschaltet. Der obere Abschnitt des Zyklus 4 wird ebenfalls von Steinsalzen aufgebaut. Anders als beim Zyklus 3 nimmt die Mächtigkeit dieses Steinsalzlagers entlang der Korrelationskette jedoch deutlich ab. Während im Norden in der Bohrung Kassebruch T2 etwa 27 m Steinsalz vorhanden ist, wurde im Süden in der Bohrung Hemmelte Z4 etwa 4 m Steinsalz erbohrt, in der Bohrung Fürstenau fehlt dieses Steinsalzgärtner sogar. Der ca. 1 m mächtige oberste Abschnitt des Zyklus 4 wurde in anhydritischer Ausbildung angetroffen. Gegenüber dem Zyklus 3 weisen die Steinsalzpakete vor allem der Bohrungen Kassebruch T2 und Goldenstedt Z20 eine stärker tonig-anhydritische Verunreinigung auf.

Die Mächtigkeit des **Zyklus 5** nimmt ebenfalls von Nord nach Süd kontinuierlich ab. Wurden in der Bohrung Kassebruch T2 noch ca. 28 m erbohrt, sind es in der Bohrung Hude Z1 nur noch ca. 12 m und in der Bohrung Fürstenau Z1 lediglich 6 m. Auch hier sind die beobachteten Mächtigkeitsunterschiede wie in den Korrelationsketten 1-1' und 2-2' im wesentlichen an die Steinsalzführung im oberen Abschnitt des Zyklus gekoppelt. So wurde z. B. in der Bohrung Kassebruch T2 ein ca. 22 m mächtiges und stark tonig-anhydritisch verunreinigtes Steinsalzgärtner erbohrt. Demgegenüber ist in der Bohrung Hude Z1 oberhalb der tonigen Basis des Zyklus 5 nur noch ein ca. 3 m mächtiges Steinsalzgärtner nachzuweisen, während der höhere Teil des Salzgärtner von einem ca. 5 m mächtigen mergeligen Anhydrit gebildet wird. Südlich der Bohrung Hude Z1 ist im oberen Bereich des Zyklus 5 kein Steinsalz mehr nachzuweisen. In diesem stratigraphischen Niveau sind für diesen Teil des Norddeutschen Beckens Anhydrite mit zwischengelagerten Mergelsteinlagen charakteristisch, die sich im Sonic-Log durch eine charakteristische Doppelspitze geringer Schall-Laufzeiten deutlich hervorheben.

Die **Zyklen 6 - 8** zeichnen sich auch in dieser Korrelationskette wieder durch sehr einheitliche Mächtigkeiten aus, die zwischen 10 und 13 m liegen. Lithologisch bestehen diese Zyklen vor allem aus Dolomitmergelsteinen in Wechsellagerung mit Anhydriten, wobei die jeweiligen Zyklen von einem Dolomitmergelsteinpaket eingeleitet werden, während Anhydrite den Abschluss bilden. Im Vergleich zu den beckenzentral gelegenen Bohrungen, in dieser Korrelationskette repräsentiert durch die Bohrung Kassebruch T2, nimmt auch die Mächtigkeit des **Zyklus 9** nach Süden hin ab. Ist der Zyklus 9 in der Bohrung Kassebruch T2 noch ca. 24 m mächtig, erreicht er weiter südlich nur noch 16 m (Bohrung Goldenstedt Z20) bzw. sogar nur 10 m in der Bohrung Fürstenau Z1. Innerhalb des Zyklus ist nach Logausbildung eine Zunahme des Mergelsteinanteils zum Hangenden hin erkennbar. Charakteristisch dafür ist ein leichter Anstieg der Gammastrahlung sowie ein leichter Anstieg in den Schall-Laufzeiten. Den Abschluss dieses Zyklus bildet ein z. T. kompakter Dolomitmergel, in den Messkurven von Gamma-Ray- und Sonic-Log dokumentiert durch relativ konstante Gammastrahlungswerte bzw. Schall-Laufzeiten. Die Grenze zum Oberen Muschelkalk liegt in einem steilen Anstieg des Sonic-Logs nach rechts und somit in einem markanten Abfall der Schall-Laufzeiten.

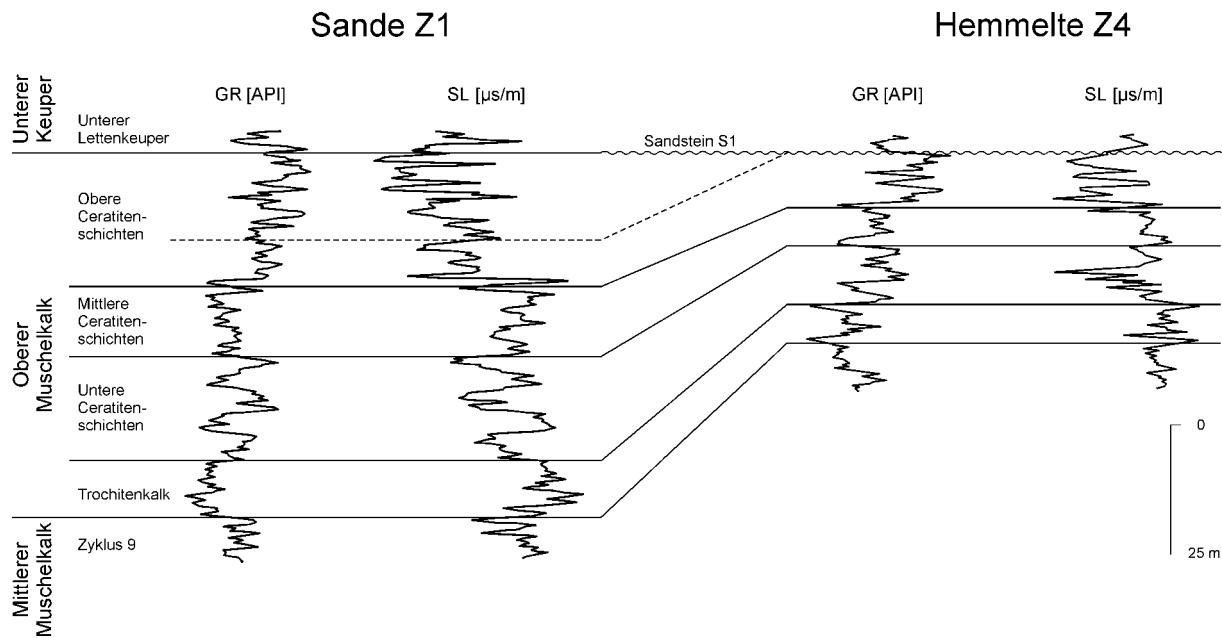


Abb. 52: Der Obere Muschelkalk in den Bohrungen Hemmelte Z4 und Sande Z1

Der Obere Muschelkalk zeigt wie auch der Mittlere Muschelkalk in Richtung Süden eine deutliche Mächtigkeitsabnahme. Südlich der Bohrung Kassebruch T2 (106 m) erreicht der Obere Muschelkalk Mächtigkeiten zwischen 57 m in der Bohrung Ganderkesee Z1 und 47 m in der Bohrung Goldenstedt Z20. Damit sind diese Mächtigkeiten mit den Werten, die DUCHROW & GROETZNER (1984) für den Oberen Muschelkalk im Osnabrücker Bergland angeben, vergleichbar. Besonders deutlich wird der Einfluss der Hunte-Schwelle in der Bohrung Hemmelte Z4, die den Oberen Muschelkalk lediglich in einer Mächtigkeit von 37 m erbohrt hat. Diese Mächtigkeitsreduktion ist auf eine transgressiver Kapung des Oberen Muschelkalks durch den Sandstein S1 zurückzuführen (Abb. 52).

6.5.5 Der Mittlere Muschelkalk in der Korrelationskette 5-5': Bevern Z1 - Siedenburg Z7 (Abb. 6, Anl. 11)

Die Korrelationskette 5-5' beginnt mit der auf der Zeven-Scholle abgeteuften Bohrung Bevern Z1 (Abb. 33). Den Kreuzungspunkt mit der Korrelationskette 1-1' bildet die Bohrung Worth Z1. Endpunkt ist die Bohrung Siedenburg Z7, die der Siedenburg-Scholle angehört (Abb. 33). Diese Korrelationskette verläuft somit senkrecht zur Beckenachse des Norddeutschen Beckens parallel der Korrelationskette 4-4'. Gegenüber der Korrelationskette 4-4' macht sich die mehr beckenzentrale Position dieser Kette vor allem im nördlichen Teilabschnitt mit höheren Mächtigkeiten des Mittleren Muschelkalks von 106 m in der Bohrung Verden Z1 und 136 m in der Bohrung Worth Z1 bemerkbar.

Der **Zyklus 1** beginnt mit einem Anstieg der Gammastrahlung. Lithologisch zeichnet sich dieser basale Teil gegenüber den unterlagernden Schaumkalkbänken durch einen höheren Mergelgehalt aus. Zum Hangenden des Zyklus 1 nimmt dann aber der Anhydritgehalt deutlich zu, gleichzeitig damit gehen die Schall-Laufzeiten im Sonic-Log zurück. Der höchste Teil des Zyklus ist in den Sonic-Logs durch eine für Anhydrit typische Logspitze gekennzeichnet. Der Zyklus 1 zeigt wie auch in den anderen Korrelationsketten eine sehr einheitliche Mächtigkeit von etwa 6 - 8 m.

Der **Zyklus 2** ist mit etwa 4 - 9 m ebenfalls relativ geringmächtig ausgebildet. Er zeigt eine einheitliche lithologische Ausbildung, über einem geringmächtigen, 1 - 3 m mächtigen basalen, tonig-anhydritischen Fuß wurde in allen Bohrungen ein ca. 2,5 m (Bohrung Bevern Z1) bis 7 m (Bohrung Sie-

denburg Z7) mächtiges Steinsalzspaket erbohrt. Eine im Sonic-Log erkennbare Spitze markiert eine Anhydritlage innerhalb dieses Steinsalzhorizontes.

Mit 29 m (Bohrung Benkeloh Z1) bis 42 m (Bohrung Worth Z1) bildet der **Zyklus 3** in allen Bohrungen dieser Korrelationskette den mächtigsten Zyklus des Mittleren Muschelkalks. Er beginnt in charakteristischer Weise mit einem basalen Tonmergelstein, gefolgt von einem Anhydrit. Diese lithologische Abfolge zeigt ein charakteristisches Logbild, über einer basalen Strahlungsspitze im Gamma-Ray-Log folgt im Sonic-Log eine Logspitze niedriger Laufzeit. Der basale Fuß des Zyklus 3 erreicht in dieser Korrelationskette einheitliche Mächtigkeiten von ca. 2 - 6 m. Den oberen Abschnitt des Zyklus bilden Steinsalze, die ca. 26 - 40 m mächtig werden und durch ein schwach differenziertes Logbild gekennzeichnet sind.

Der **Zyklus 4** besitzt einen ähnlichen lithologischen Aufbau wie der Zyklus 3. Auch er beginnt mit einem höherstrahlenden tonigen, z. T. anhydritischen Fuß. Ein zwischengeschaltetes Steinsalzlagert führt aufgrund seiner extrem niedrigen Gammastrahlung zu einer markanten Doppelspitze. Überlagert wird dieses Schichtpaket von einem etwa 18 - 27 m mächtigen Steinsalzspaket.

Die Basis des **Zyklus 5** ist in den Logs ebenfalls aufgrund eines höherstrahlenden, jedoch vorwiegend mergelig-anhydritischen Fußes deutlich gegen das unterlagernde Steinsalz des Zyklus 4 abzugrenzen. Im oberen Abschnitt des Zyklus 5 haben alle Bohrungen Steinsalz angetroffen. Dabei handelt es sich um zwei jeweils etwa 1 - 3 m mächtige Steinsalzlagen, die mit Anhydriten wechsellagern. Im Sonic-Log ist dieser Bereich durch drei markante Anhydritspitzen charakterisiert.

Aufgrund der engen Wechsellagerung von höher strahlenden Dolomitmergelsteinen und niedriger strahlenden Anhydriten ist das Logbild der **Zyklen 6 - 8** relativ unruhig. In allen Bohrungen ist ein Anstieg der Gammastrahlung an der Basis des Zyklus 6 kennzeichnend. Die Gesamtmächtigkeiten der einzelnen Zyklen liegen einheitlich zwischen 12 und 15 m.

Den Abschluss des Mittleren Muschelkalks bildet der karbonatisch dominierte **Zyklus 9**, dessen Mächtigkeit mit 13 - 18 m im Verlauf dieser Korrelationskette ebenfalls nur geringen Schwankungen unterworfen ist.

Die Grenze zwischen Mittleren und Oberen Muschelkalk ist auch in der Korrelationskette 5-5' durch einen markanten Abfall der Schall-Laufzeit im Sonic-Log gut zu erkennen.

6.5.6 Der Mittlere Muschelkalk in der Korrelationskette 6-6': Grevesmühlen 1/87 - Remlingen 5 (Abb. 6, Anl. 12)

Die Korrelationskette 6-6' quert das Norddeutsche Becken in N-S-Richtung. Strukturell erstreckt sie sich vom Ostholstein-Westmecklenburg-Block (Bohrung Grevesmühlen 1/87) im Norden zur Elmscholle (Bohrung Remlingen 5) im Süden. Aus paläogeographischer Sicht werden in dieser Korrelationskette mit den Bohrungen Grevesmühlen 1/87, Mölln-Tief 1 und Schwerin 1/87 Profile aus dem nördlichen Norddeutschen Becken sowie der Holstein-Mecklenburg-Senke und mit den Bohrungen Drawehn T1, Lemgow Z1 sowie Remlingen 5 und 7 aus dem Bereich der Ostabdachung der Eichsfeld-Altmark-Schwelle dargestellt.

Die Mächtigkeiten für den Mittleren Muschelkalk schwanken zwischen etwa 86 m in der Bohrung Remlingen 7 und ca. 136 m in der Bohrung Kaarßen 1/87. Die Bohrprofile aus dem Einflussbereich der Eichsfeld-Altmark-Schwelle sind dabei gegenüber den Bohrungen der umgebenden Senkungsgebiete durch geringere Mächtigkeiten (ca. 86 - 105 m) gekennzeichnet. Diese Mächtigkeitsreduktion des Gesamtprofils wird in den schwellenwärtigen Profilen im wesentlichen durch geringere Steinsalzmächtigkeiten des Zyklus 4 hervorgerufen, d. h. in den beckentieferen Regionen des Norddeutschen Beckens wie der Holstein-Mecklenburg-Senke akkumulierte zur Zeit des Zyklus 4 deutlich mehr Steinsalz als im Bereich der Eichsfeld-Altmark-Schwelle. Alle weiteren Zyklen zeichnen sich

durch eine mehr oder weniger gleichbleibende Mächtigkeit aus. So wird der **Zyklus 1** auch in dieser Korrelationskette mit den für das gesamte norddeutsche Muschelkalkbecken charakteristischen Mächtigkeiten von 6 - 11 m angetroffen.

Der **Zyklus 2** setzt mit einer markanten Mergelsteinspitze im Gamma-Ray- und Sonic-Log ein, dem sich eine Anhydritspitze im Sonic-Log anschließt. Steinsalze gelangten in diesem Zyklus nicht zur Ablagerung, so dass geringe Mächtigkeiten von ca. 2 - 7 m typisch für diesen Beckenbereich sind.

Im **Zyklus 3** folgt dagegen über einem geringmächtigen mergelig-anhydritischen Fuß ein bis zu 46 m mächtiges Steinsalzpaket.

Der **Zyklus 4** weist gegenüber dem Zyklus 3 in fast allen Bohrungen eine deutlich geringere Mächtigkeit auf. Ursache hierfür ist die geringere bis fehlende Steinsalzführung. Steinsalze wurden im Zyklus 4 nur in den Bohrungen der Holstein-Mecklenburg-Senke sowie in den westlich der zentralen Eichsfeld-Altmark-Schwelle gelegenen Bohrungen Braudel Z1 (ca. 21 m) und Bodenteich Z1 (ca. 5 m) aufgrund der Logindikationen nachgewiesen. Lediglich in den Bohrungen Remlingen 5 und 7 erreicht der Zyklus 4 eine gegenüber dem Zyklus 3 höhere Mächtigkeit. Wie bereits in Kap. 6.5.1 beschrieben, wird diese unterschiedliche Mächtigkeitsverteilung zum einen auf die paläostrukturelle Position der Bohrungen zurückgeführt, die z. T. im Bereich der Eichsfeld-Altmark-Schwelle liegen, und zum anderen hat eine muschelkalkzeitliche intraformationelle Subrosion von Halit zu Mächtigkeitsreduktionen geführt.

Der **Zyklus 5** enthält in den Bohrungen dieser Korrelationskette kein Steinsalz mehr, sondern es herrscht eine dolomitisch-mergelige bis anhydritische Ausbildung vor. Der obere Abschnitt dieses Zyklus ist im Sonic-Log, wie auch bereits für die Korrelationskette 2-2' beschrieben, durch zwei markante Anhydritspitzen gekennzeichnet.

Ein unruhiges Logbild vor allem im Sonic-Log ist auch in dieser Korrelationskette für den Schichtabschnitt der **Zyklen 6 - 8** typisch und weist auch hier auf enge Wechsellagerungen von Dolomitmergelsteinen und Anhydrit hin. Eine leichte Verschiebung der Sonic-Log-Messkurve zu etwas höheren Schall-Laufzeiten innerhalb der Zyklen 6 und 7 deutet eine Dominanz von Dolomitmergeln an. Dieses Logbild ändert sich mit dem Zyklus 8, eine deutliche Abnahme der Schall-Laufzeiten wird auf das Vorhandensein von Dolomiten zurückgeführt. Dieser Bereich geringerer Schall-Laufzeiten lässt sich als Marker-Horizont sehr gut verfolgen und aushalten.

Der **Zyklus 9** ist durch einen kontinuierlichen Anstieg der Laufzeiten gekennzeichnet. Typisch für diesen Zyklus sind Mächtigkeiten zwischen ca. 8 m, erbohrt in der Bohrung Remlingen 7, und ca. 19 m in der Bohrung Mölln-Tief 1.

Die Grenze zum Oberen Muschelkalk lässt sich in allen Bohrungen gut fassen, sie liegt wiederum in einem markanten Rückgang der Gammastrahlung sowie der Schall-Laufzeiten, der den Übergang zur kalkig dominierten Sedimentation des Trochitenkalks im Oberen Muschelkalk anzeigen.

Die in der Korrelationskette 6-6' zu beobachtenden Mächtigkeitsschwankungen des Schichtpaketes Unterer, Mittlerer und Oberer Muschelkalk sind größtenteils sekundär bedingt. Ursache für diese Mächtigkeitsreduktion sind markante Hebungsphasen, die vor Beginn des Unteren Keupers (Erfurt-Formation) und innerhalb des Mittleren Keupers vor Beginn der Stuttgart- und Arnstadt-Formation stattfanden. Diese mehrfach auftretenden Hebungsphasen waren verbunden mit Sedimentationsunterbrechungen sowie einer z. T. tiefgreifenden erosiven Kappung des Oberen Muschelkalks. Die Bohrung Drawehn T1 hat z. B. den Oberen Muschelkalk in einer Restmächtigkeit von lediglich 8 m erbohrt, der hier diskordant von Steinmergelkeuper (km4, Arnstadt-Formation) überlagert wird.

6.6 Stratigraphisches Konzept für den Mittleren Muschelkalk Norddeutschlands

Die hier vorgestellte Gliederung des Mittleren Muschelkalks beruht auf einer litho- und logstratigraphischen Klassifikation der Schichtenfolge (s. a. Kap. 5. 4). Es wurden lithologische Einheiten (Zyklen) ausgeschieden, von denen man annimmt, dass sie ein annähernd gleiches (quasi-isochrones) Alter aufweisen. Diese Zyklen lassen sich anhand von Logkorrelationen z. T. beckenweit verfolgen, wenngleich oft unter lateralen Faziesveränderungen. Auf Grund der beobachteten großflächigen relativen Einheitlichkeit scheinen sowohl die Zyklen als auch deren Unter- und Obergrenzen quasi-isochron zu sein. Dies bedeutet, dass auch die Grenzen der Karlstadt-, der Heilbronn- und der Diemel-Formation annähernd isochron sind. Für eine exakte Alterseinstufung gibt es jedoch z. Zt. weder biostratigraphische noch sonstige Beweise.

Die Untergliederung des Mittleren Muschelkalks in Karlstadt-, Heilbronn- und Diemel-Formation ist an das Vorkommen von Steinsalzen und massigen sedimentären Anhydriten in den Zyklen 2 bis 8 geknüpft. Mit Hilfe der Logkorrelationen konnte nachgewiesen werden, dass in der Heilbronn-Formation die vollsalinare Sedimentation, die zur Ausbildung der verschiedenen Steinsalzlager geführt hat, je nach paläogeographischer Position innerhalb des Norddeutschen Beckens regional zu unterschiedlichen Zeiten beginnt und auch endet. Im Bereich der vollsalinaren Sedimentation sind die den Mittleren Muschelkalk aufbauenden Sedimentationszyklen als typische salinare Zyklen mit einer Abfolge von Karbonat über Sulfat zu Halit entwickelt. Die beobachteten Mächtigkeitsdifferenzierungen insbesondere der Zyklen 2 bis 6 sind vor allem an das Auftreten der Halithorizonte gebunden. Die am Aufbau der salinaren Zyklen beteiligten karbonatischen und sulfatischen Schichten lassen sich dagegen über die Halitverbreitung hinaus mit relativ konstanten Mächtigkeiten bis in die Randgebiete verfolgen.

Zusätzlich zur lithostratigraphischen Gliederung in Formationen und Zyklen scheiden HAGDORN & SIMON (in Vorb.) so genannte „Folgen“ aus (mm1 - mm3), die als allostratigraphische Einheiten beckenweit verfolgt werden können.

Lithostratigraphie		Allostratigraphie
Formation (PTSK)	Zyklus diese Arbeit	Folge
Diemel-Formation	Zyklus 9	mm3
Heilbronn- Formation	Zyklus 8	mm2
	Zyklus 7	
	Zyklus 6	
	Zyklus 5	
	Zyklus 4	
	Zyklus 3	
	Zyklus 2	
Karlstadt-Formation	Zyklus 1	mm1

Tab. 8: Stratigraphische Gliederung des Mittleren Muschelkalks im Norddeutschen Becken

6.7 Parallelisierung regionaler Gliederungen des Mittleren Muschelkalks im Norddeutschen Becken

Die hier vorgestellte Zyklische Feingliederung des Mittleren Muschelkalks des Norddeutschen Beckens kann mit den bisherigen Bearbeitungen von SCHULZE (1964), WOLBURG (1969), ALTHEN et al. (1980), BEUTLER (1993) oder GAERTNER & RÖHLING (1993) verglichen werden.

Die Grenze Unterer/Mittlerer Muschelkalk wurde an den Bohrkernen der Bohrung Remlingen 7 mit unterschiedlichen Methoden definiert und an die Oberkante der Oberen Schaumkalkbank gelegt. Bereits in den Arbeiten von ALTHEN et al. (1980), BEUTLER (1993), GAERTNER (1993) sowie GAERTNER & RÖHLING (1993) wurden die *orbicularis*-Schichten dem Mittleren Muschelkalk zugeordnet.

WOLBURG (1969), der den Mittleren Muschelkalk in eine liegende Salinarserie (mm1) und in eine hangende Dolomit-Mergel-Serie (mm2) untergliederte (Tab. 4), wählte als Liegengrenze des Mittleren Muschelkalks die Basis des Muschelkalksalzes. Dies bedeutet, dass der oberste Bereich bzw. die Schichtgruppe i des von ihm in 9 Schichtgruppen (a-i) unterteilten Unteren Muschelkalks heute bereits zum Mittleren Muschelkalk zu rechnen ist. In den hier vorgelegten Korrelationsketten (Anl. 7 - 12, Kap. 7.6) wird deutlich, dass das erste Auftreten von Muschelkalksteinsalz entsprechend der paläogeographischen Position zu unterschiedlichen Zeiten und damit in unterschiedlichen Zyklen einsetzt. Dies macht ebenfalls deutlich, dass je nach paläogeographischer Position das Muschelkalksteinsalz einen unterschiedlichen stratigraphischen Umfang besitzt und die Obergrenze der Schichtgruppe i demnach eine Faziesgrenze darstellt. Während z. B. in der Bohrung Remels T1 Steinsalz bereits im Zyklus 2 nachgewiesen werden konnte und die Schichtgruppe i damit neben dem Zyklus 1 auch den basalen, halitfreien Abschnitt des Zyklus 2 umfasst (Abb. 53), gehören der Schichtgruppe i z. B. in den Bohrungen, in denen Steinsalz erstmalig im Zyklus 3 zur Ablagerung kam, auch noch der gesamte höhere Teil des Zyklus 2 sowie zusätzlich der halitfreie Basisbereich des Zyklus 3 an. Eine Parallelisierung der WOLBURG'schen Gliederung mit der hier angewandten Gliederung in Zyklen ist möglich, wie Abb. 53 zeigt. Nicht nur die Basis des mm1 sensu WOLBURG ist diachron, sondern auch die Obergrenze dieser Schichteinheit stellt eine Faziesgrenze dar. Als Obergrenze des mm1 definierte er das Aussetzen der reinen Halitfazies, d.h. die Dolomit-Mergel-Serie sensu WOLBURG beginnt oberhalb der Halitfazies und damit je nach paläogeographischer Situation zu unterschiedlichen Zeiten. Während in vielen Bohrungen des Norddeutschen Beckens die Halitführung mit dem Zyklus 4 endet, gelangten Steinsalze in einzelnen Bohrungen des Beckens auch noch in den Zyklen 5 bis 7 zur Ablagerung. Dies bedeutet, dass sowohl die Unter- als auch die Obergrenze der Halitverbreitung nicht immer mit der Grenze eines Zyklus zusammenfällt, da das Ein- und Aussetzen der Halite lokal in verschiedenen Zyklen stattfindet. Im Vergleich zu der auf Faziesunterschieden beruhenden Gliederung WOLBURGs stellt die hier angewandte Gliederung eine Leitbankstratigraphie dar, in der mit Hilfe lithologisch-Zyklischer Kriterien Leithorizonte auch über Faziesgrenzen hinaus verfolgt werden können.

TRUSHEIM (1971) ergänzte die Gliederung von WOLBURG, in dem er das von WOLBURG lediglich als mm1 ausgehaltene Salinar des Mittleren Muschelkalkes in die Salinargruppen A, B, C und D unterteilte (Abb. 53). Diese Salinargruppen werden nach TRUSHEIM durch tonig-mergelige Zwischenmittel, die er mit den Buchstaben r, s und t bezeichnete, getrennt. In der Bohrung Remels T1 entspricht die Salinargruppe A annähernd dem Zyklus 2, jedoch ließ TRUSHEIM diese erst mit dem Anhydrit des unteren Abschnitts des Zyklus 2 beginnen. Der den Anhydrit unterlagernde Tonmergelstein, der in der hier vorgestellten Gliederung die Basis des Zyklus 2 markiert, wurde von TRUSHEIM der basalen Schichteinheit des Mittleren Muschelkalk zugerechnet. Die Salinargruppen B, C und D werden jeweils mit den oberen Abschnitten der Zyklen 3, 4 und 5 parallelisiert, während die Zwischenmittel r, s und t mit den unteren Abschnitten der Zyklen 3, 4 und 5 korrelieren.

Remels T1

diese Arbeit

WOLBURG (1969), TRUSHEIM (1971)

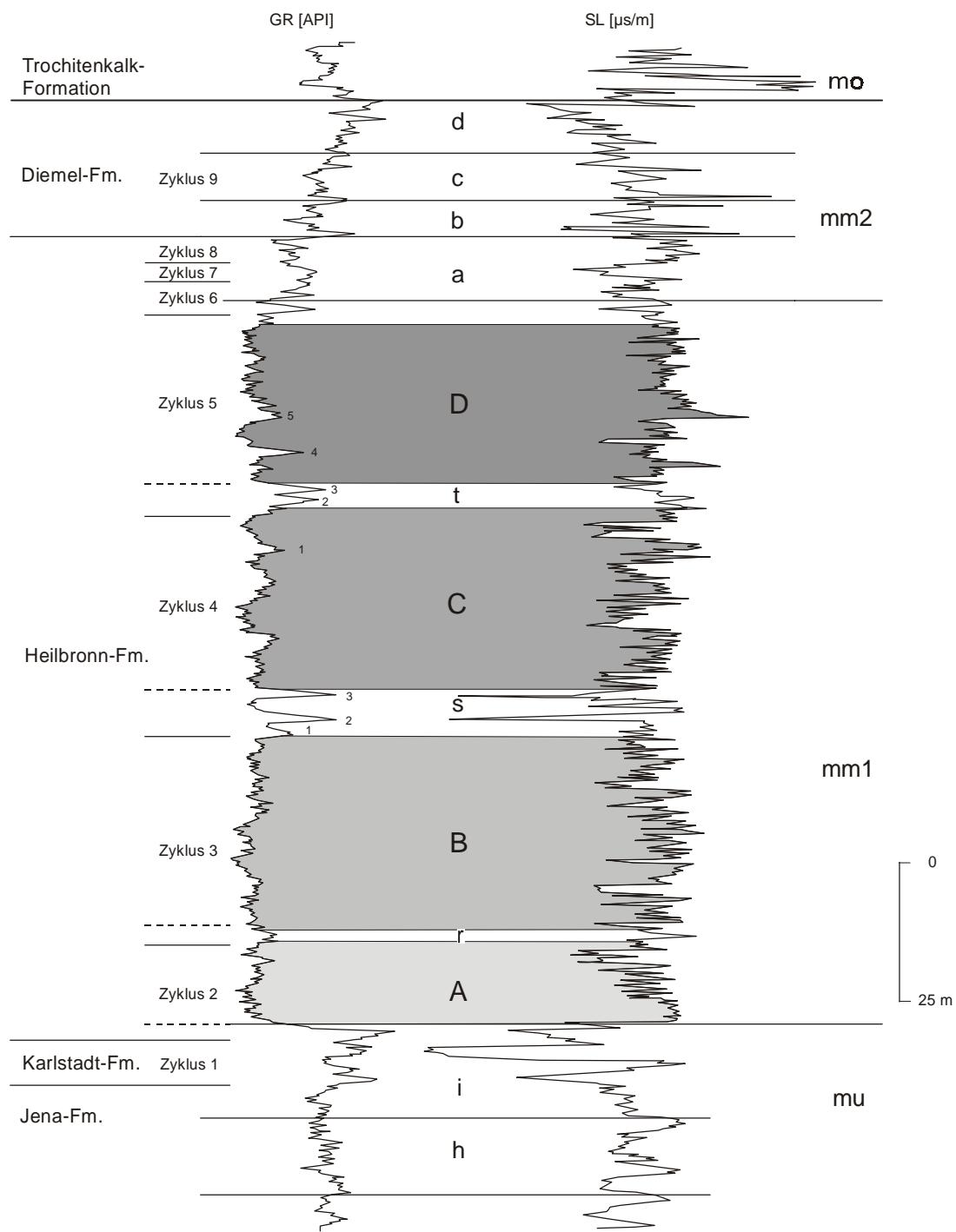


Abb. 53: Lithostratigraphische Korrelation der Zyklen des Mittleren Muschelkalks mit den Gliederungen von WOLBURG (1969) und TRUSHEIM (1971) am Beispiel der Bohrung Remels T1

Während TRUSHEIM (1971) davon ausging, dass die älteste Salinargruppe, die Salinargruppe A, mit einer relativ konstanten Mächtigkeit von ca. 15 m die größte Verbreitung hat, haben diese Untersuchungen gezeigt, dass das Steinsalz des Zyklus 3 regional am weitesten verbreitet ist. Dies wird be-

sonders deutlich in der Korrelationskette 1-1' (Anl. 7). Hier ist zu erkennen, dass der Zyklus 2 nach Osten immer geringmächtiger wird, hervorgerufen durch die Abnahme der Steinsalzmächtigkeiten und schließlich das Aussetzen der Steinsalzführung in östliche Richtung. Einzelne Steinsalzvorkommen finden sich östlich der Bohrung Worth Z1 nur noch in einzelnen lokalen Senken (Abb. 51, Bohrung Oberg Z1).

SCHULZE (1964) untergliederte den Mittleren Muschelkalk im Bereich der Scholle von Calvörde (nachfolgend Calvörde-Scholle, BALDSCHUHN & KOCKEL 1997), wo er fünf Anhydrit- und sechs Dolomit-Horizonte abgrenzte. Diese lithostratigraphisch definierten Einheiten erlangten, da ihre faciellen Vertretungen ebenfalls korreliert werden können, überregionale stratigraphische Bedeutung. Die Gliederung sensu SCHULZE wurde für Nordostdeutschland von verschiedenen Autoren wie ALTHEN et al. (1980), BEUTLER (1993) und BRÜCKNER-RÖHLING & LANGBEIN (1993) immer wieder angewandt.

Abb. 54 zeigt eine Parallelisierung der Gliederung des Mittleren Muschelkalks nach SCHULZE (1964) mit der in dieser Arbeit verwendeten Zyklischen Gliederung. In dieser Abbildung wurden zum Vergleich der beiden Gliederungen die Bohrungen Calvörde 2/62 (SCHULZE 1964) und die Bohrung Remlingen 5 gegenübergestellt. Die von SCHULZE als Dolomit I und Gips Ia abgegrenzte Schichtenfolge entspricht in der Bohrung Remlingen 5 dem Bereich der Zyklen 1 und 2 sowie der Basis des Zyklus 3, wobei der Gips Ia mit dem oberen Abschnitt des Zyklus 2 und der Basis des Zyklus 3 parallelisiert wird. Die darüber folgenden Schichten der Zyklen 3 und 4 wurden von SCHULZE der Salinarfolge zugeordnet. Diese sind in der Bohrung Calvörde 2/62 ebenfalls halitisch entwickelt und enthalten einzelne anhydritische Zwischenlagen. Danach lassen sich die Zyklen 3 und 4 eindeutig mit der Salinarfolge parallelisieren. In der Bohrung Calvörde 2/62 wird auch deutlich, dass die Steinsalze des Zyklus 3 gegenüber denen des Zyklus 4 deutlich mächtiger sind.

Abgeschlossen wird die Salinarfolge vom Gips Ib, der in der Bohrung Calvörde 2/62 ca. 6 m mächtig wird. Nach Logkorrelation mit der Bohrung Remlingen 5 entspricht der Gips Ib dem Anhydrit an der Basis des Zyklus 5. Der untere mergelige Abschnitt des Zyklus 5 korreliert mit dem Dolomit II, der in der Bohrung Calvörde 2/62 als eine Wechsellagerung von Dolomit und Dolomitmergelstein vorliegt. Der von SCHULZE als Gips II abgegrenzte ca. 2-3 m mächtige und durch tonig-dolomitische Lagen geschichtete Anhydrit findet sein Gegenstück in der Bohrung Remlingen 5 im oberen Abschnitt des Zyklus 5. Die drei darüber folgenden Gamma-Ray-Spitzen des Zyklus 7, die durch in Dolomitmergeln eingeschaltete Anhydrite hervorgerufen werden, sind dem Dolomit III sensu SCHULZE (1964) zuzuordnen. Im höchsten Teil des Zyklus 6 findet sich in der Bohrung Remlingen 5 ein ca. 2 m mächtiger Anhydrit, der mit dem Gips III der Calvörde-Scholle zu korrelieren ist.

Der Zyklus 7 umfasst in seinem unteren Teil den Dolomit IV, im höheren Teil den Gips IV. SCHULZE beschrieb den Dolomit IV als einen etwa 10 m mächtigen Dolomitmergelstein, der durch einzelne Dolomitlagen eine deutliche Feinschichtung aufweist. In diese Wechsellagerung sind weiterhin dunkelgraue Anhydritlagen zwischengeschaltet. Eine ca. 1 m mächtige und ungefähr 2 m über der Basis des Dolomit IV auftretende Anhydrit- bzw. Gipsbank kann über die gesamte Calvörde-Scholle verfolgt werden. Diese Anhydrit- bzw. Gipsbank bildet jedoch nicht nur in dieser Region einen guten Marker-Horizont. So wird in der Bohrung Remlingen 5 der dem Dolomit IV entsprechende untere Abschnitt des Zyklus 6 durch eine Anhydritspitze zweigeteilt, die als das Äquivalent der auf der Calvörde-Scholle auftretenden Anhydrit- bzw. Gipsbank angesehen werden muss. Der obere ca. 4 m mächtige Abschnitt des Zyklus 7 entspricht dem Gips IV sensu SCHULZE. Ein unruhiger Kurvenverlauf sowohl des Gamma-Ray- als auch des Sonic-Logs belegen den Wechsellagerungscharakter dieses Schichtabschnittes, wie er auch von SCHULZE für den Gips IV der Calvörde-Scholle beschrieben wurde.

Der Zyklus 8 findet sein Gegenstück im Dolomit V und im Gips V, wobei dem Gips V die oberen ca. 2 m des Zyklus zugeordnet werden. SCHULZE beschrieb den Gips V als einen etwa 2 m mächtigen,

durch dünne Dolomitmergelsteinlagen feingeschichteten Anhydrit, der jedoch nicht immer eindeutig auszuhalten ist, da er z. T. sehr geringmächtig und als Tonmergelstein-Gips-Wechselleagerung ausgebildet ist. Der den Mittleren Muschelkalk auf der Calvörde-Scholle abschließende Dolomit VI wird mit dem Zyklus 9 korreliert. Dabei fällt auf, dass der Zyklus 9 in der Bohrung Remlingen 5 deutlich mächtiger ausgebildet ist als der entsprechende Dolomit 6 in der von SCHULZE veröffentlichten Bohrung Calvörde 2/62. Dies ist auf eine Diskrepanz beider Gliederungen in der Grenzziehung Mittlerer/Oberer Muschelkalk zurückzuführen. Während in der Bohrung Remlingen 5 die Grenze zum Oberen Muschelkalk in einen markanten Abfall der Gammastrahlung sowie in einer markanten Abnahme der Schall-Laufzeiten liegt, die der lithologisch definierten Grenze Gelbe Basisschichten/Trochitenkalk-Formation entspricht, sah SCHULZE die Grenze in einem Anstieg der Gammastrahlung sowie in einem relativ hohen Widerstandswert. Nach den Logkorrelationen ist davon auszugehen, dass SCHULZE die Gelben Basisschichten, die heute zum Mittleren Muschelkalk gerechnet werden, in den Oberen Muschelkalk stellte.

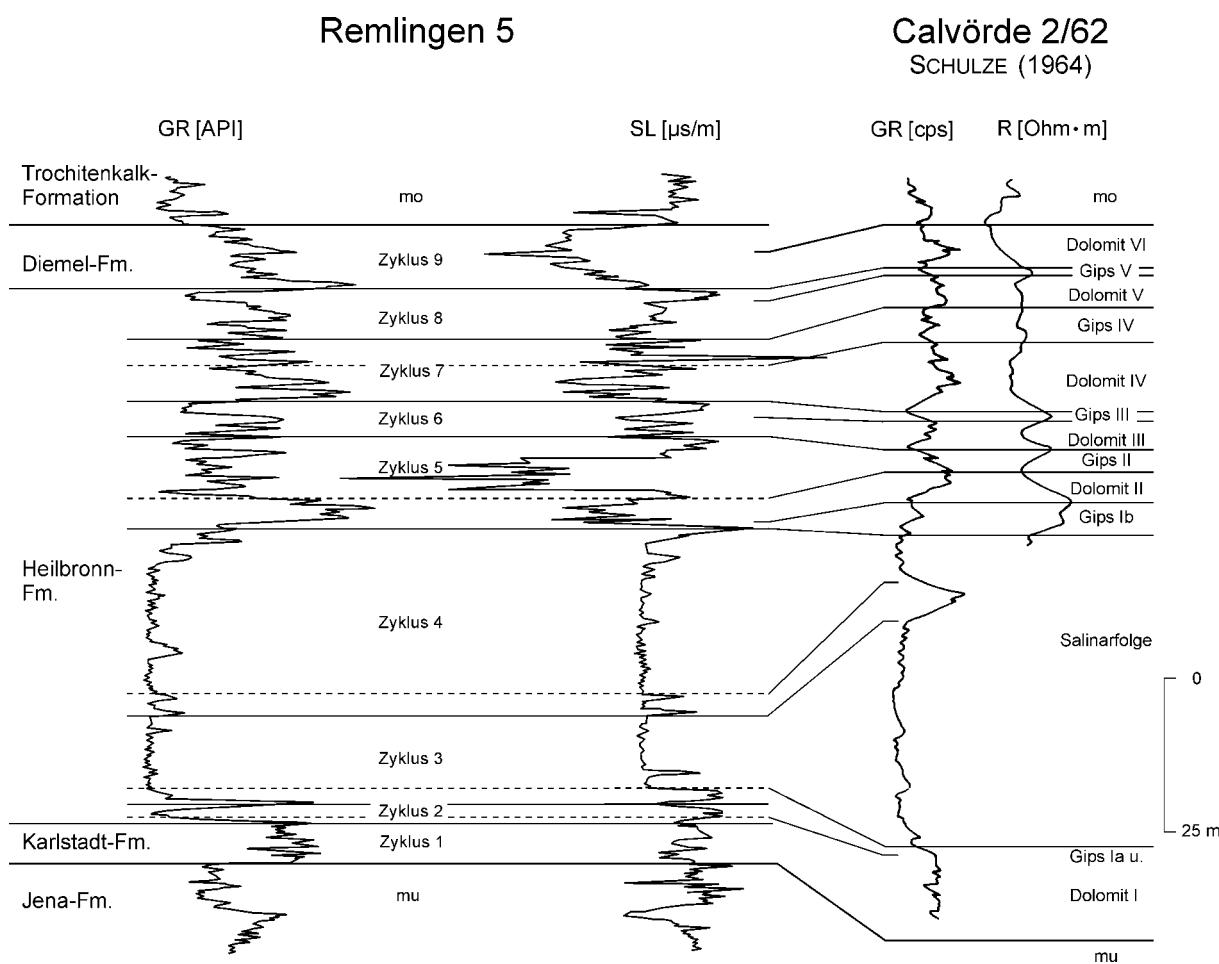
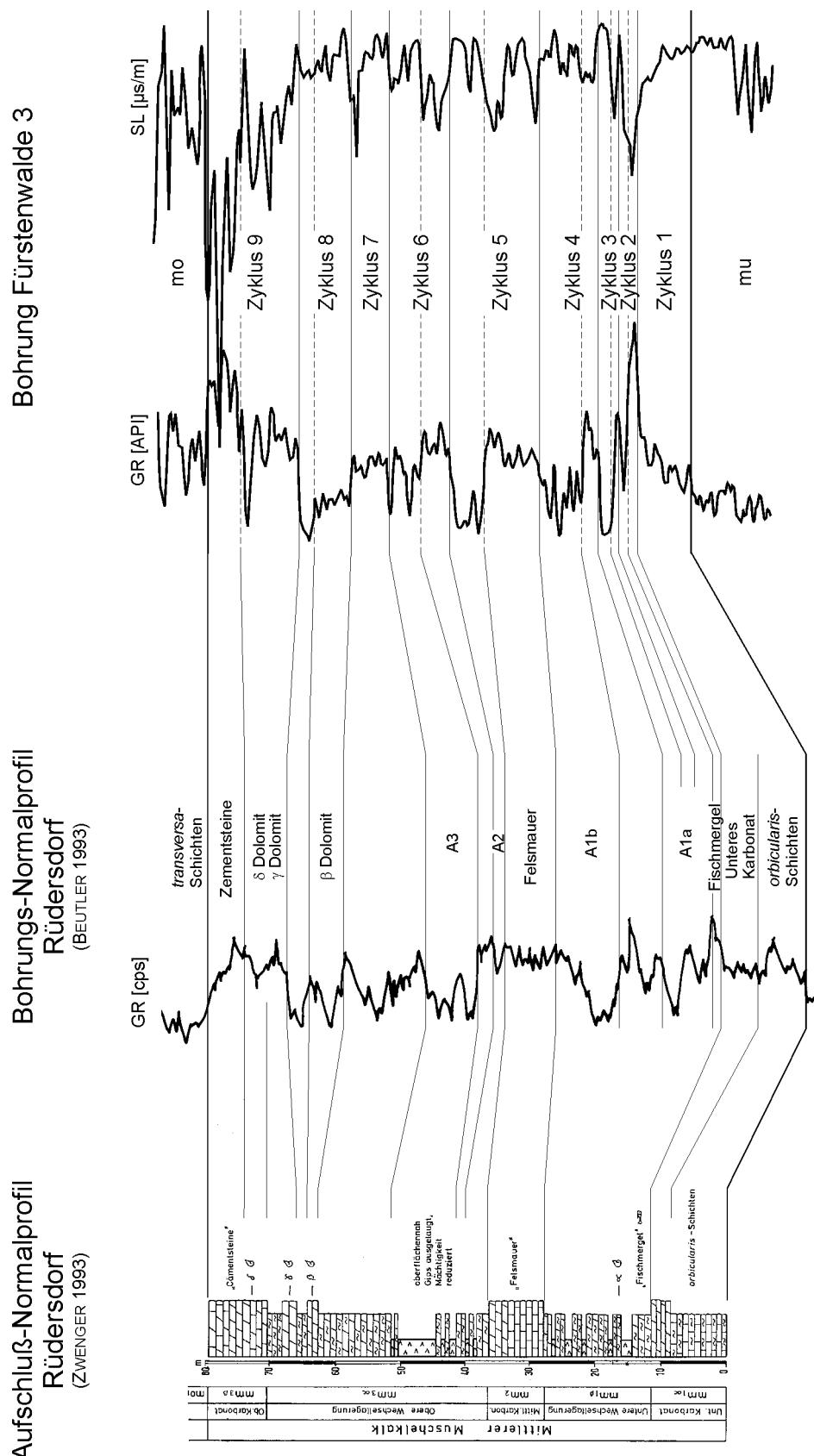


Abb. 54: Lithostratigraphische Korrelation der Zyklen des Mittleren Muschelkalks der Bohrung Remlingen 5 mit der Bohrung Calvörde 2/62

Anhand der Bohrung Fürstenwalde 3 wird über ein geophysikalisch gut vermessenes Bohrprofil die Gliederung des Mittleren Muschelkalks im Bereich der Struktur Rüdersdorf (BEUTLER 1993, ZWENGER 1993) mit der Zyklischen Gliederung des Norddeutschen Beckens verglichen (Abb. 55).



Die Schichtenfolge des Mittleren Muschelkalks in Rüdersdorf wird lithologisch in ein Unteres Karbonat ($mm_{1\alpha}$), eine Untere Wechsellagerung ($mm_{1\beta}$), ein Mittleres Karbonat (mm_2), eine obere Wechsellagerung ($mm_{3\alpha}$) und ein Oberes Karbonat ($mm_{3\beta}$) untergliedert. Besondere stratigraphische Bedeutung werden in dieser Schichtenfolge dem „Fischmergel“ an der Basis der Unteren Wechsellagerung, der „Felsmauer“, eine von ZIMMERMANN (1900) eingeführte Bezeichnung für das Mittlere Karbonat, sowie dem Oberen Karbonat, das von Rüdersdorfer Bergleuten aufgrund ihrer Nutzung als hydraulisches Bindemittel als „Cämentsteine“ (ZWENGER 1993) bezeichnet wird, eingeräumt. Diese sowie markante Horizonte der SCHULZESCHEN Gliederung konnte BEUTLER (1993) auch in einem Bohrungs-Normalprofil der Struktur Rüdersdorf mit Hilfe des Gamma-Ray-Logs identifizieren. Die Grenze Unterer/Mittlerer Muschelkalk in der Bohrung Fürstenwalde 3 korreliert eindeutig mit der Basis der *orbicularis*-Schichten des Profils Rüdersdorf. Das von BEUTLER oberhalb der *orbicularis*-Schichten abgegrenzte Untere Karbonat wird mit dem oberen Abschnitt des Zyklus 1 in der Bohrung Fürstenwalde 3 parallelisiert, ist hier jedoch deutlich mergeliger ausgebildet. Als markante Logspitze hebt sich die Basis des Zyklus 2 deutlich ab. Sie entspricht dem als „Fischmergel“ bezeichneten dolomitischen Mergel an der Basis der Unteren Wechselsequenz. Die Untere Wechsellagerung ist nach ZWENGER (1993) durch eine dreimalige, zyklische Aufeinanderfolge von dolomitischen Mergeln charakterisiert, in die sich jeweils nach oben zunehmend Gipse einlagern. Diese drei zyklisch aufgebauten Teilabfolgen werden mit den in der Bohrung Fürstenwalde 3 ausgehaltenen halitfreien Zyklen 2 bis 4 korreliert.

Eine massive Gamma-Spitze kennzeichnet die Basis des Zyklus 5. Dieser im Log der Bohrung Fürstenwalde 3 ca. 4,5 m mächtige Horizont wird dem Mittleren Karbonat des Profils Rüdersdorf, einer Wechsellagerungen von gelblichgrauen kalkigen Dolomiten und dolomitischen Kalksteinen, zugeordnet. Der obere Abschnitt des Zyklus 5 wird mit dem A 2 parallelisiert und der Oberen Wechsellagerung zugerechnet. Ebenfalls der Oberen Wechsellagerung sind die Zyklen 6 - 8 zuzuordnen. Dabei entspricht der obere Abschnitt des Zyklus 6 dem von BEUTLER (1993) ausgehaltenen A 3. Oberhalb des Zyklus 6 wird nach Logbefund für die Bohrung Fürstenwalde 3 eine dolomitisch-mergelige Sedimentation angenommen. Dies entspricht der lithologischen Ausbildung des entsprechenden Schichtabschnitts im Profil Rüdersdorf. Über einem ca. 6 m mächtigen Gips, der mit dem A 3 parallelisiert wird, folgen zunächst vor allem dolomitische Mergelsteine, die der Oberen Wechsellagerung zugeordnet werden. Darüber folgen dolomitische Kalksteine und kalkige Dolomite des Oberen Karbonats, das dem Zyklus 9 zugerechnet wird. Die Grenze zum Oberen Muschelkalk stimmt mit der Grenzziehung von BEUTLER für das Normalprofil Rüdersdorf überein. Die Schichten des Oberen Muschelkalkes werden als *transversa*-Schichten bezeichnet. Sie heben sich im Log der Bohrung Fürstenwalde 3 durch ihre deutlich geringere Gammastrahlung sowie geringere Schall-Laufzeiten vom unterlagernden Mittleren Muschelkalk ab, d.h. auch hier liegt diese Grenze in einem markanten Abfall der Strahlungintensitäten bzw. der Laufzeiten.

Für den Mittleren Muschelkalk Nordwestdeutschlands erarbeiteten GAERTNER & RÖHLING (1993) eine kleinzyklische Loggliederung. Mit Hilfe geophysikalischer Bohrlochmessungen, insbesondere des Gamma-Ray- und des Sonic-Logs gelang es ihnen, insgesamt 13 Logzyklen auszuhalten und diese innerhalb des Nordwestdeutschen Beckens zu verfolgen. Die einzelnen Logzyklen lassen sich ihrerseits aufgrund lithologischer Merkmale in die Unteren Dolomitmergel, das Muschelkalk-Salinär und die Oberen Dolomitmergel zusammenfassen. In Abb. 56 (Bohrung Braudel Z1, Raum Wendland) sind die Zyklen den Logzyklen sensu GAERTNER & RÖHLING (1993) gegenübergestellt.

Wie die Logkorrelationen im Norddeutschen Becken gezeigt haben, besteht eine Diskrepanz zwischen beiden Gliederungen in der Abgrenzung des Mittleren Muschelkalks gegen den unterlagernden Unteren Muschelkalk. Es ist zu erkennen, dass auch GAERTNER & RÖHLING (1993) die Grenze Unterer/Mittlerer Muschelkalk in einen Anstieg der Gammastrahlung bzw. der Schall-Laufzeiten legten. Jedoch müssen nach lithostratigraphischen Vergleich mit den Bohrkernen der Bohrung Remlingen 7 die Logzyklen I und II noch dem Unteren Muschelkalk zugerechnet werden. Dabei entspricht der Log-

zyklus I dem obersten Bereich des Oberen Wellenkalks, während Logzyklus II dem Bereich der Schaumkalkbänke zugeordnet wird. Die Logzyklen III und IV sensu GAERTNER & RÖHLING werden mit dem Zyklus 1 parallelisiert. Zyklus 2 entspricht dem Logzyklus V, wobei die Logzyklen Va und Vb dem unteren mergeligen Abschnitt bzw. dem oberen anhydritischen Abschnitt des Zyklus entsprechen. Die Zyklen 3 und 4, die in der Bohrung Braudel Z1 in ihrem oberen Abschnitt durch mächtige Steinsalzhorizonte gekennzeichnet sind, können eindeutig mit den Logzyklen VI und VII korreliert werden. Dabei hielten GAERTNER & RÖHLING den basalen, tonig-anhydritischen Fuß jeweils als Kleinzyklus a aus. Ein im Hangenden des Zyklus 4 folgender anhydritischer Bereich an der Basis des Zyklus 5 wurde von GAERTNER & RÖHLING als Kleinzyklus VIIc dem Logzyklus VII zugeordnet. Der darüber folgende Logzyklus VIII wurde nach GAERTNER & RÖHLING in der Bohrung aus dem Wendland in die Kleinzyklen a, b und c unterteilt.

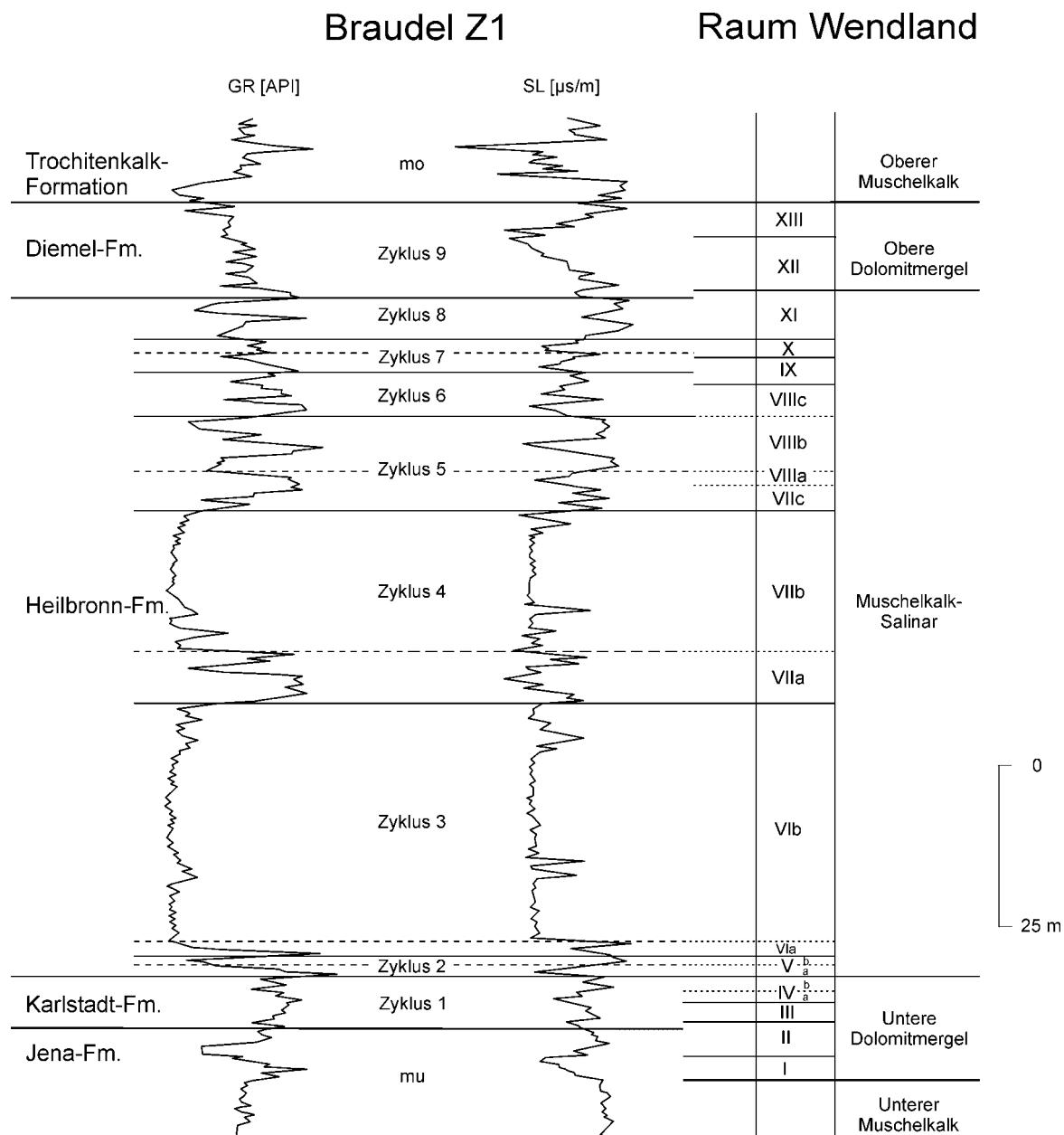


Abb. 56: Korrelation der Zyklen des Mittleren Muschelkalks der Bohrung Braudel Z1 mit den von GAERTNER & RÖHLING (1993) in dieser Bohrung (Raum Wendland) definierten Logzyklen

Während die Kleinzyklen VIIIa und VIIIb mit dem Zyklus 5 zu parallelisieren sind, ausgenommen der anhydritischen Basis, entspricht der Kleinzyklus VIIIc dem Zyklus 6, wobei der oberste Anhydrit des Zyklus 6 bereits zum Kleinzyklus IX zuzurechnen ist. Dieser Logzyklus IX wird in der Bohrung aus dem Wendland von einem Anhydrit an der Basis und einem Mergelstein am Top aufgebaut. Dabei korreliert der Mergelstein des Logzyklus IX mit dem Basisbereich des Zyklus 7. Der darüber folgende Abschnitt des Zyklus 7 wird dem Logzyklus X zugeordnet.

Logzyklus XI korreliert mit dem Zyklus 8, jedoch reicht dieser bis in den Zyklus 9, da die im Gamma-Ray-Log erkennbare Tonmergelspitze an der Basis des Zyklus 9 von GAERTNER & RÖHLING noch dem Logzyklus XI zugerechnet wird. Die Logzyklen XII und XIII entsprechen dem Zyklus 9. Die Grenze zum Oberen Muschelkalk wird in beiden Gliederungen in den Bereich eines starken Abfalls der Gammastrahlung gelegt.

Im Gegensatz zur Gliederung in der Bohrung Braudel Z1, wo der Logzyklus VIII in die Kleinzyklen VIIIa, VIIIb und VIII c unterteilt wurde, gliederten GAERTNER & RÖHLING diesen Zyklus in einer Bohrung aus dem Bereich des Weser-Troges nur in die Kleinzyklen VIIIa und VIIIb. Somit entspricht die Obergrenze des Logzyklus VIII in dieser Bohrung eindeutig der oberen Begrenzung des Zyklus 5. Der darüber folgende Logzyklus IX wird mit dem Zyklus 6, der Logzyklus X mit dem Zyklus 7 parallelisiert (Abb. 57).

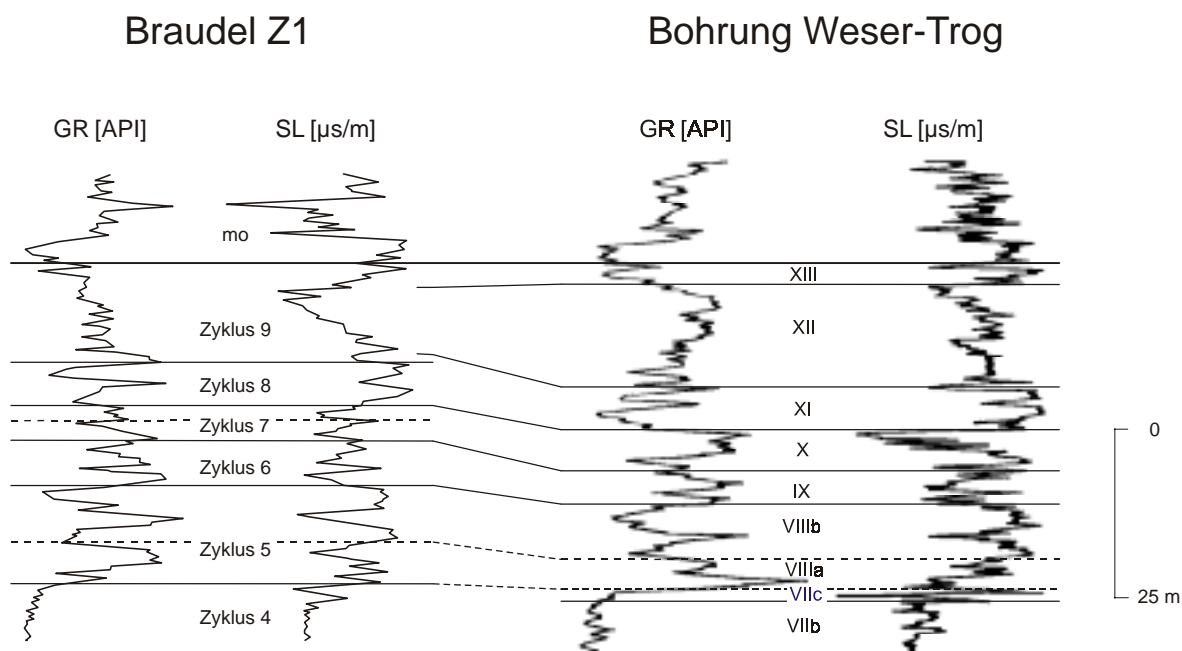


Abb. 57: Korrelation der Zyklen 5 bis 9 des Mittleren Muschelkalks in der Bohrung Braudel Z1 mit den Logzyklen einer Bohrung des Weser-Troges

Mit der Korrelation dieser beiden auf geophysikalischen Bohrlochmessungen beruhenden Gliederungen konnte gezeigt werden, dass die von GAERTNER & RÖHLING (1993) definierten Log- bzw. Kleinzyklen zwangslässig mit der Zyklischen Gliederung zu parallelisieren sind. Sie lassen sich eindeutig den einzelnen Formationen zuordnen. Die Logzyklen III und IV korrelieren mit dem Zyklus 1 und repräsentieren demzufolge die Karlstadt-Formation. Die Logzyklen IV bis X entsprechen den Zyklen 2 bis 8 und damit der Heilbronn-Formation. Die Diemel-Formation bzw. der Zyklus 9, korreliert mit den Kleinzyklen XII und XIII.

6.8 Korrelation des Mittleren Muschelkalks Norddeutschlands mit dem Mittleren Muschelkalk Süddeutschlands

Die vorhergehenden Untersuchungen konzentrierten sich auf die WNW-ESE gerichtete Zentalsenke des Mitteleuropäischen Beckens, das Norddeutschen Becken. Im Folgenden soll die für das Norddeutsche Becken erarbeitete Gliederung des Mittleren Muschelkalks in Zyklen auf die süddeutschen Muschelkalkgebiete zu übertragen werden. Während des Mittleren Muschelkalks bestand über die Hessische und auch die Thüringen-Westbrandenburg-Senke eine Verbindung vom Norddeutschen Becken zu den süddeutschen Sedimentationsgebieten. Dabei setzt sich die Thüringen-Westbrandenburg-Senke nach Süden bzw. Südwesten in die Muschelkalkgebiete Frankens sowie der Kraichgau-Senke fort, während die Hessische Senke nach Südwesten in die Pfälzer Senke zu verfolgen ist. Im Vergleich zum Buntsandstein hat jedoch die Hessische Senke und die Thüringen-Westbrandenburg-Senke trennende Eichsfeld-Altmark-Schwelle in ihrem südlich des Harzes gelegenen Abschnitt keine so große Bedeutung mehr. Diese Schwellenzone lässt sich nach Süden über die Rhön und den Spessart bis in die Nordvogesen verfolgen.

Während des Mittleren Muschelkalks lassen sich in den süddeutschen Muschelkalkgebieten von Nordost nach Südwest vier „Steinsalzbecken“ unterscheiden (FRIEDEL 1988: Abb. 21):

- Unterfranken (Kitzingen, Burgbernheim)
- Mittlerer Neckar (Heilbronn, Kochendorf)
- Oberer Neckar (Stetten, Haigerloch)
- Hochrhein (Rheinfelden, Schweizerhalle).

Nach Südosten zum Vindelizischen Land, d.h. zum Rand des Muschelkalkbeckens, wird die Steinsalzmächtigkeit immer geringer. Bereits im Raum Dinkelsbühl ist kein massives Steinsalz mehr vorhanden. Jedoch finden sich dort mehrere Horizonte, die auf eine synsedimentäre Auflösung des Muschelkalk-Steinsalzes hinweisen (SIMON 1995). Diese Auflösung erfolgte durch vom Festland zugeführtes Süßwasser. Beckenrandwärts folgt auf die Salinarfazies eine dolomitische (z. B. Raum Kronach) und letztendlich eine sandige Fazies (z. B. Raum Kemnath und Grafenwöhr).

Im Bereich der Hessischen Senke konnten Steinsalzvorkommen bisher nicht nachgewiesen werden (HAGDORN et al. 1987). Ähnlich wie im Bereich der Thüringischen Senke dürfte ehemals primär vorhandenes Steinsalz subdoriert worden sein. Nach LAEMMLEN (1975) zeugen Residualbrekzien in Osthessen von einem ehemals vorhandenen, jetzt aber abgelagerten Steinsalzlager. FRIEDEL (1988) sieht im Unteren Residualton (mm3) der Bereiche Unterer und Oberer Neckar nicht nur die verunreinigten Rückstände eines ehemals vorhandenen Steinsalzlagers, sondern auch um die Relikte einer Sulfat-Ton-Dolomit-Wechsllagerung.

Bisherige Arbeiten zum Mittleren Muschelkalk in Süddeutschland konzentrierten sich vor allem auf stratigraphische, lithologische sowie fazielle Fragestellungen. Bearbeitungen unter Verwendung geophysikalischer Bohrlochmessungen sind äußerst selten. Für den Vergleich bzw. die Korrelation der Schichtenfolge des Mittleren Muschelkalks zwischen Nord- und Süddeutschland konnte neben der Arbeit von FRIEDEL (1988) vor allem die von SIMON (1988) bearbeitete und veröffentlichte Solebohrung Bad Rappenau herangezogen werden.

In der Solebohrung Bad Rappenau wurde unter quartärer Bedeckung die Schichtenfolge vom Unteren Gipskeuper bis in die *orbicularis*-Schichten des tiefsten Mittleren Muschelkalks erbohrt. Der Mittlere Muschelkalk wurde ab dem Oberen Steinsalz gekernt. Ein Gamma-Ray-Log liegt jedoch nur für den nicht gekernten Bereich vor.

Die Grenze Unterer/Mittlerer Muschelkalk wurde von der Bohrung Bad Rappenau nicht aufgeschlossen, da sie in den *orbicularis*-Schichten ihre Endteufe erreicht. SIMON stellte die *orbicularis*-Schichten dagegen noch in den Unteren Muschelkalk. Neben diesem Schichtglied grenzte er im basa-

len Teil des Kernbohrprofils zwei weitere Schichtseinheiten aus, die Basisschichten sowie den Unterer Dolomit. FRIEDEL (1988) dagegen untergliederte diesen Bereich nur in zwei Untereinheiten, in die *orbicularis*-Schichten und den Unterer Dolomit. Sowohl auf der Basis ihrer lithologischen Ausbildung als auch ihres Logbildes im Gamma-Ray-Log werden die *orbicularis*-Schichten, die Basisschichten und der Bereich des Unterer Dolomits mit dem Zyklus 1 und dem basalen Teil des Zyklus 2 parallelisiert. Der in der Bohrung Bad Rappenau darüber abgegrenzte Grundanhidrit (SIMON 1988) bzw. das Basissulfat nach FRIEDEL dürfte danach dem oberen Abschnitt des Zyklus 2 sowie dem unteren Abschnitt des Zyklus 3 entsprechen. Er ist somit das Äquivalent des Gipses Ia sensu SCHULZE (1964). Das an den Grundanhidrit anschließende Steinsalzpaquet wurde von SIMON in ein Unterer Steinsalz, ein Bändersalz sowie ein Oberes Steinsalz untergliedert. Besonders auffällig sind in diesem Steinsalzlager zwei 1 bzw. 1,5 m mächtige Anhydrit- bzw. Dolomitbänke. Diese im Bändersalz eingeschalteten beiden Zwischenmittel lassen sich nach SIMON auch im Raum Heilbronn nachweisen. Nach den vorliegenden Korrelationen lassen sie sich mit dem basalen Bereich des Zyklus 4 im Norddeutschen Becken parallelisieren (Abb. 58). Danach korrelieren das Untere Steinsalz und der untere Teil des Bändersalzes mit dem Steinsalzlager im höchsten Abschnitt des Zyklus 3. Darüber folgen das erste anhydritische Zwischenmittel, eine salinare Zwischenschicht, das obere anhydritisch-dolomitische Zwischenmittel und der obere Teil des Bändersalzes sowie das darüber folgende Obere Steinsalz. Diese Schichtenfolge wird mit dem Zyklus 4 des Norddeutschen Beckens parallelisiert.

Im Bereich des Oberen und Unterer Neckar entsprechen den Zyklen 3 und 4 Norddeutschlands dem dort abgegrenzten Unterer Residualton sowie dem darüber folgenden Unterer Sulfat. Analog den Bohrungen im Norddeutschen Becken, in denen lediglich ein Halitlager entwickelt ist (und zwar im Zyklus 3, z. B. Bohrung Drawehn T1, s. Anl. 12), wird auch hier davon ausgegangen, dass es im Gebiet des Oberen und Unterer Neckar ebenfalls nur zu einem vollsalinaren Sedimentationszyklus gekommen ist. Demzufolge wird der Untere Residualton dem Zyklus 3 zugeordnet.

Der oberhalb des Unterer Sulfats folgende Schichtabschnitt ist im Bereich des Oberen und Unterer Neckar vorwiegend dolomitisch entwickelt und wurde von FRIEDEL (1988) als Mittlerer Dolomit bezeichnet. In der Bohrung Rappenau entspricht diesem Schichtpaquet eine Wechsellagerung von Anhydrit, Dolomit und Tonmergelstein, die SIMON (1988) als Übergangszone aushiebt. Im Gamma-Ray-Log fällt diese Schichtenfolge durch eine deutlich erhöhte Gammastrahlung auf und kann mit dem basalen Teil des Zyklus 5 Norddeutschlands parallelisiert werden.

Das darüber lagernde Obere Sulfat (FRIEDEL 1988) bzw. die Anhydritregion nach SIMON (1988) wird dem Bereich der Zyklen 6 - 8 zugeordnet. Diese Anhydritregion zeigt im Gamma-Ray-Log der Bohrung Rappenau eine markante Wechsellagerung von m-mächtigen niedrig- und höherstrahlenden Schichtpaketen, die Anhydrit- bzw. Dolomitmergelsteine zugeordnet werden. Eine Zuordnung dieser Wechsellagerung zu den Zyklen 6 - 8 ist wahrscheinlich, da auch sie in Schwemmen- bzw. Beckenrandgebieten des Norddeutschen Beckens aus einer Abfolge von Dolomitmergelsteinen an der Basis und Anhydriten im höchsten Teil des jeweiligen Zyklus bestehen (s. Abb. 58).

Die Obere Dolomitregion (SIMON 1988) bzw. der Obere Dolomit (FRIEDEL 1988) korreliert mit dem Zyklus 9. Die Grenze zum Oberen Muschelkalk wird in Süddeutschland an die Basis von fossilreichen knauerigen Kalken der Zwergfauna-Schichten gelegt, die im Gamma-Ray-Log durch einen markanten Abfall der Gammastrahlung gekennzeichnet ist.

Bad Rappenau ▶ (SIMON 1988) ▶ **Remlingen 5**

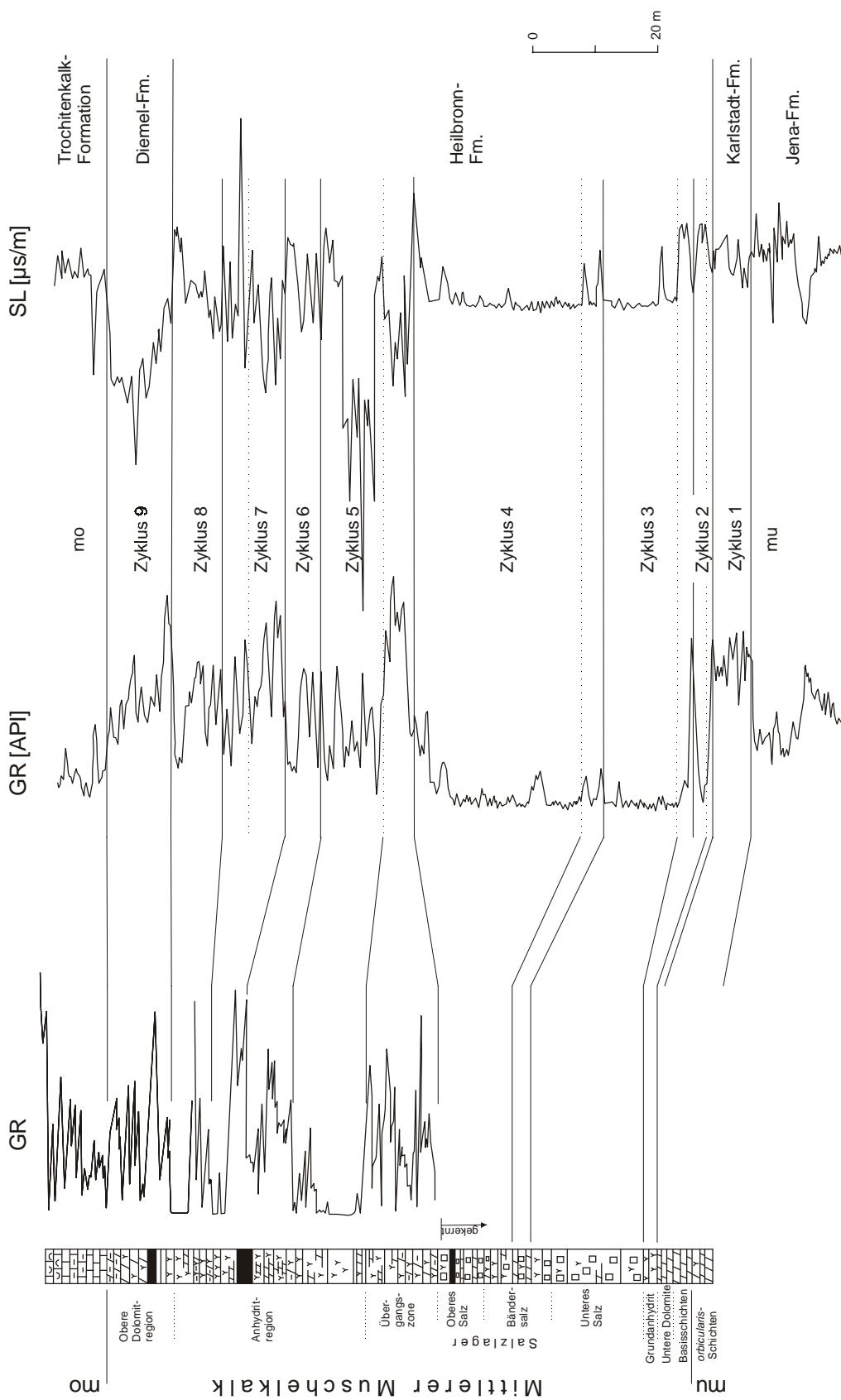


Abb. 58: Korrelation der Chemozyklen des Mittleren Muschelkalks des Norddeutschen Beckens mit der süddeutschen Muschelkalk-Solebohrung Bad Rappenau

7 PALÄOGEOPGRAPHISCHE REKONSTRUKTION DES NORDDEUTSCHEN BECKENS ZUR ZEIT DES MITTEL-REN MUSCHELKALKS

Der zyklische Aufbau des salinaren Mittleren Muschelkalks kann beckenweit zu einer Feingliederung der Schichtenfolge genutzt werden. Diese kleinzyklische Gliederung lässt sich trotz lateraler und auch vertikaler Faziesschwankungen sowie Mächtigkeitsänderungen für die einzelnen Kleinzyklen durch Logkorrelationen in den norddeutschen Bohrprofilen von der Ems bis an die Oder und vom nördlichen Beckenrand bis zu den norddeutschen Mittelgebirgen und darüber hinaus bis Süddeutschland wiederfinden.

Nach den vorliegenden Ergebnissen haben epirogen, teilweise auch taphrogene sowie sockelinduzierte halokinetische Bewegungen während der Sedimentation des Mittleren Muschelkalks zu z. T. recht bedeutenden Mächtigkeitsvariationen und Faziesdifferenzierungen geführt. Die Logkorrelationen zeigen jedoch auch, dass im paläogeographischen Bild des Mittleren Muschelkalks die synsedimentären Bewegungen an den Sockelstörungen insgesamt nur eine untergeordnete Rolle gespielt haben und sie nur lokal von größerer Bedeutung waren. In den Korrelationsketten sowie im Mächtigkeitsbild für den Mittleren Muschelkalk pausen sich vor allem die großräumigen paläogeographischen Elemente (z. B. Hunte-Schwelle, Eichsfeld-Altmark-Schwelle) durch, die bereits die Sedimentation und Verbreitung des höheren Zechsteins (BEST 1989) und des Buntsandstein (RÖHLING 1991a) gesteuert haben (Abb.31, 32). Verschiebungen der Schwellen- und Beckenachsen konnten nicht festgestellt werden.

In dem generell NW-SE streichenden Norddeutschen Becken liegt das Hauptsubsidenzzentrum zur Zeit des Mittleren Muschelkalks im Bereich der niedersächsischen Küstenregion, wo Mächtigkeiten von mehr als 150 m durch Bohrungen nachgewiesen sind. Nach Norden, Osten und Süden gehen diese Mächtigkeiten dann zu den Randgebieten des Norddeutschen Beckens kontinuierlich zurück.

Die zu beobachtenden Mächtigkeitsdifferenzierungen sind je nach paläogeographischer Situation vor allem an das Auftreten von Steinsalzen in den Zyklen 2 - 5 geknüpft. Der älteste Steinsalzhorizont des Zyklus 2 findet sich nur in den tieferen, beckenzentralen Bereichen des Norddeutschen Beckens bzw. in einzelnen lokalen Subsidenzzentren. Beispielhaft sei hier die Bohrung Oberg Z1 im Bereich der Hildesheim-Scholle (Ost) genannt.

Während der Bildung der Zyklen 3 und 4 hat sich der halitische Sedimentationsraum gegenüber dem des Zyklus 2 deutlich ausgedehnt. Innerhalb dieser beiden halitführenden Zyklen erreichen die Steinsalze ihre flächenmäßig größte Ausdehnung, wobei die Halite des Zyklus 3 die größten Mächtigkeiten aufweisen. Mit Hilfe überregionaler Logkorrelationen konnte gezeigt werden, dass sich die vollsalinare Entwicklung zu dieser Zeit über die Hessische Senke und die Thüringen-Westbrandenburg-Senke bis nach Süddeutschland ausdehnte.

Nach TRUSHEIM (1971) können Salinare expansive bzw. restriktive Salinarentwicklungen aufweisen. Diese Entwicklung, die bereits in der Salinarentwicklung des Zechsteins deutlich zu erkennen ist (BEST 1986, 1989), ist auch im Mittleren Muschelkalk zu beobachten. Das Salinar des Mittleren Muschelkalks entwickelt sich, wie oben gezeigt werden konnte, zunächst expansiv. Ausgehend von dem auf das Beckenzentrum beschränkten ältesten halitführenden Zyklus dehnt sich der saline Sedimentationsraum zunächst kontinuierlich aus. Die maximale Halit-Verbreitung wird mit den Salinaren der Zyklen 3 und 4 erreicht. Dann setzt eine restriktive Salinarentwicklung ein. Die Salinarentwicklung zieht sich in fortschreitendem Maße auf das Beckenzentrum zurück, so dass sich das Steinsalzlager des Zyklus 5 zunehmend wieder auf die beckenzentralen Bereiche des Norddeutschen Beckens beschränkt.

Während die älteren Steinsalzlager in den Zyklen 2 - 5 eine flächenhafte, im wesentlichen subsidenzgesteuerte Verbreitung aufweisen, sind die Steinsalze der Zyklen 6 und 7 dagegen an lokale, tektonisch induzierte Subsidenzzentren gebunden. In diesen lokalen Grabenstrukturen setzen die tektoni-

schen Bewegungen jedoch schon während der tieferen Salinarhorizonte ein, wie dies die Mächtigkeitsentwicklung der in den Grabenzonen abgeteuften Bohrungen (Abb. 59) zeigt.

Wie die überregionalen Logkorrelationen zeigen, zeichnen sich die Zyklen 1 sowie 6 - 9 im gesamten Becken durch relativ einheitliche Mächtigkeiten aus. In den Schwellengebieten wie der Hunte- oder der Eichsfeld-Altmark-Schwelle sind die Mächtigkeiten des Mittleren Muschelkalks insgesamt zwar deutlich reduziert, jedoch sind alle Kleinzyklen in gleichem Maße von dieser Mächtigkeitsreduktion betroffen. Synsedimentäre Schichtausfälle bzw. eine Kondensation einzelner Kleinzyklen bis hin zur Nichtsedimentation und damit zu primären Schichtausfällen konnten nirgends beobachtet werden. Für die Schwellengebiete sind Mächtigkeiten zwischen 49 m, erbohrt in der auf der Hunte-Schwelle gelegenen Bohrung Fürstenau Z1, und ca. 90 m in der Bohrung Remlingen 7, abgeteuft auf der Eichsfeld-Altmark-Schwelle, typisch.

Weiterhin sind deutliche Mächtigkeitsreduktionen zu den Beckenrändern des Norddeutschen Beckens zu beobachten. In den Bohrungen am östlichen Beckenrand wurden in Ostbrandenburg (Korrelationskette 2 und 3, Anl. 8, 9) Mächtigkeiten zwischen 75 und 90 m nachgewiesen. Steinsalzhorizonte wurden hier nur in den Bohrungen Feldberg 1/87 und Zehdenick 2/75 angetroffen. In den weiter östlich gelegenen Bohrungen des Norddeutschen Beckens tritt dann kein Steinsalz mehr auf. Die Abfolge des Mittleren Muschelkalks ist hier durch Wechsellagerungen von Tonmergelstein, Dolomitmergelstein und Anhydrit gekennzeichnet. Im Bereich der Ostbrandenburg-Schwelle werden die Anhydrite der Zyklen 7 und 8, wie dies in der Bohrung Fürstenwalde 3 gezeigt werden konnte, vor allem durch Karbonate vertreten.

In der Bohrung Zehdenick 2/75 ist der Mittlere Muschelkalk mit 136 m in einer für diese paläogeographische Position am Ostrand des salinaren Muschelkalkbeckens deutlich höheren Mächtigkeiten erbohrt worden. Ursache hierfür ist wahrscheinlich die Anlage einer primären Randsenke des Salzstocks Kraatz zur Zeit des Muschelkalks.

Nach reflexionsseismischen Messungen aus Schleswig-Holstein (Glückstadt-Graben), aus dem Gebiet der südlichen Nordsee (Horn-Graben) und aus Ostfriesland (Westdorf-Graben) (Abb. 36) sind in den dort nachgewiesenen tektonisch aktiven Zonen für das Gesamtschichtpaket des Mittleren Muschelkalks Mächtigkeitsvariationen von etwa 1 : 8 gegenüber den benachbarten, „normalen“ Beckengebieten festzustellen. Dabei handelt es sich vor allem um Mächtigkeitsanschwellungen in den halitführenden Abschnitten der einzelnen Zyklen.

Mit rund 525 m hat die Bohrung Westdorf 2A eines der mächtigsten Profile des Mittleren Muschelkalks im Norddeutschen Becken angetroffen. Dieses untypische Profil wurde im Bereich der Norderney-Westdorf-Scholle erbohrt. Der Untere Muschelkalk liegt in dieser Bohrung noch in seiner für das Becken charakteristischen Fazies- und Mächtigkeitsentwicklung vor. Dies gilt nach den Logkorrelationen und den Spülprobenbeschreibungen auch für den Bereich des Zyklus 1. Nach Ablagerung dieses ersten Zyklus setzte dann eine beschleunigte Subsidenz der Westdorf-Scholle ein, die sich zum „Westdorf-Graben“ entwickelte. Während die auf den benachbarten Schollen abgeteuften Bohrungen ein Normalprofil des Mittleren Muschelkalks erbohrt haben, ist das durch die Bohrung Westdorf 2A aufgeschlossene Profil durch eine mächtige Salinarentwicklung gekennzeichnet. In den Zyklen 2 - 7 wurden insgesamt sechs Steinsalzlager mit einer Gesamtmächtigkeit von etwa 416 m nachgewiesen. Diese verstärkte Absenkung setzt sich darüber hinaus noch in den halitfreien Zyklen 8 und 9 fort. Die extremen Mächtigkeiten des Oberen Muschelkalks sowie des Keupers zeigen, dass sie auch während der Ablagerung dieser Schichten weiterhin andauerte (Abb. 59).

Als Ursache für diese abnormalen Mächtigkeiten im Westdorf-Graben sind differentielle Bewegungen an den die Westdorf-Scholle begrenzenden Sockelstörungen (Siegelsum-Norderney-Manuela-Störungszone auf der Westseite, Bedekaspel-Marga-Johanna-Störungszone im Osten) anzunehmen. Ausgelöst durch die tektonischen Bewegungen an diesen den Graben begrenzenden Sockelstörungen kommt es dabei auch zu ersten halokinetischen Bewegungen, die zu frühen Zechsteinsalz-Abwande-

rungen aus den Grabenbereichen und zur Salzakkumulation in Form von Salzkissen auf den angrenzenden Hochlagen führten. Ähnliche Verhältnisse werden nach seismischen Unterlagen auch für den Glückstadt-Graben, den Horn-Graben und die Braunschweig-Gifhorn-Bruchzone erwartet, in denen für den Muschelkalk Gesamtmächtigkeiten von 1 000 m (Glückstadt-Graben) und 1 600 m (Horn-Graben) nachgewiesen worden sind (BEST et al. 1993, KOCKEL 1995, GELUK et al. 2000).

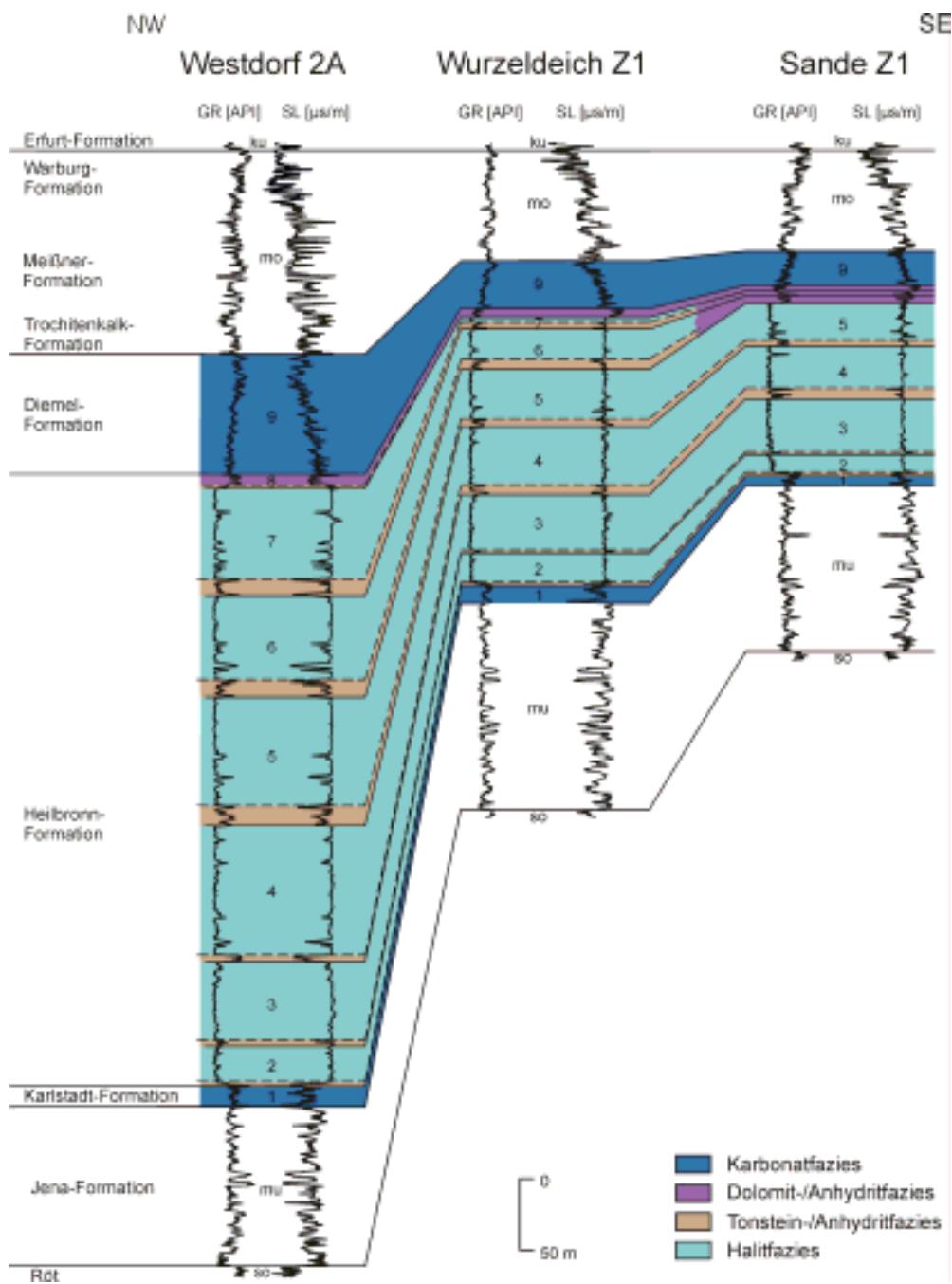


Abb. 59: Korrelation des Mittleren Muschelkalks aus dem zentralen Bereich des Westdorf-Grabens (Westdorf 2A) über den SE-Rand (Wurzeldeich Z1) ins Norddeutsche Becken (Sande Z1)

Synsedimentäre Tektonik ist jedoch nicht nur auf das Norddeutsche Becken beschränkt. WIDMER (1991) geht aufgrund seiner Untersuchungen zur Anhydritgruppe in der Nordwestschweiz ebenfalls von differentiellen Subsidenzunterschieden aus, die nach seiner Auffassung in Zusammenhang mit der

Wiederbelebung der Permo-Karbon-Tröge der Nordschweiz stehen. HAUBER (1980) weist ebenfalls auf mögliche synsedimentäre Brüche im Bereich des Schweizer Salzfeldes Riburg-Möhlin hin.

Synsedimentäre tektonische Bewegungen in Form von Horst- und Grabenbildungen haben lokal einen wesentlichen Einfluss auf das paläogeographische Bild des Mittleren Muschelkalks (Abb. 32). Eine verstärkte Subsidenz führte in den nachgewiesenen Grabenstrukturen wie dem Westdorf-Graben (Abb. 36) zur Ausbildung mächtiger Schichtpakete. Dabei folgen die synsedimentär tektonischen Aktivitäten einem alten Bruchsystem, dass bereits während des Perms, der tieferen Trias (Buntsandstein) und auch der höheren Trias (Keuper) wesentlichen Einfluss auf die Mächtigkeits- und Faziesentwicklung im Norddeutschen Becken hatte (RÖHLING 1991a, FRISCH & KOCKEL 1998, BRÜCKNER-RÖHLING & KOCKEL 1999, RÖHLING & KOCKEL 1999, GELUK et al. 2000). Die Anlage dieses permo-triasisch aktiven Bruchsystems innerhalb des Norddeutschen Beckens ist eng mit der initialen Phase des Auseinanderbrechens Pangäas verknüpft. Diese wird dem Zeitraum Perm bis Jura zugeordnet und führte zur Anlage des Arktis-Nordatlantik Rifts sowie des Tethys Rifts (s. a. ZIEGLER 1982, 1990). Von den damit verbundenen und in der Trias mehrfach auftretenden tektonischen Bewegungen wurde auch das Mitteleuropäische Triasbecken sowie das Norddeutsche Becken als dessen Beckenzentrum betroffen. Ein Großteil der mesozoischen Graben- und Horststrukturen sind an diese permokarbon angelegten Sockelstörungszonen gebunden.

Aus der Fazies- und der Mächtigkeitsverteilung der einzelnen faziellen Einheiten und aufgrund des Fehlens eines gut ausgeprägten Bromprofils wird als Ablagerungsraum ein mehr oder weniger flaches Becken angenommen, das zeitweilig vom vollmarinen Ablagerungsraum der Tethys abgeschlossen war. Die Verbindungswege zur Tethys lagen im Südosten bzw. im Südwesten. Nach Norden und Westen war dieses Randbecken abgeschlossen. Es handelt sich demnach um ein durch „Barren“ zeitweilig abgetrenntes flaches Becken („Shallow Barred Basin“ sensu EINSELE 1991). Dabei wird der zeitweilig eingeschränkte oder zeitweilig auch unterbrochene Zufluss der vollmarinen Wässer auf tektonische Bewegungen im Bereich der Verbindungswege zur vollmarinen Tethys zurückgeführt (s. a. SZULC 2000).

Die Faziesverteilung des Mittleren Muschelkalks im Mitteleuropäischen Becken weist auf ein solches flaches Barrenbecken („Shallow Barred Basin“) hin. Im polnischen Beckenbereich nordwestlich der Schlesisch-Moravischen und der Ostkarpaten Pforte prägen Karbonate bzw. Dolomite das Faziesbild des Mittleren Muschelkalks. Weiter nach Nordwesten in die Zentralsenke des Mitteleuropäischen Beckens wurden die Ablagerungsbedingungen zunehmend restriktiver, eine Zunahme der salinaren Fazies (Sulfate und Halite) in diese Richtung ist zu verzeichnen.

Anhand der ausgeglichenen Mächtigkeitsverteilung sowie der Verbreitung der einzelnen Halithorizonte wird für dieses Becken ein relativ gleichmäßiges Subsidenzmuster angenommen. Lokal zu beobachtende höhere Mächtigkeiten sind an Grabenstrukturen gebunden, die aufgrund tektonischer Bewegungen eine vom übrigen Becken abweichende Subsidenz aufweisen. Die Mächtigkeitsverteilung der einzelnen Halitzyklen zeichnet so die Subsidenzgeschichte dieses Beckens während des Mittleren Muschelkalks nach. Während im zentralen Mitteleuropäischen Becken für die Zyklen 2 - 5 eine deutliche höhere Subsidenz durch die Ablagerung der Halithorizonte angezeigt wird, muss in den darüber folgenden Zyklen von einem weniger absinkenden zentralen Beckenbereich ausgegangen werden. Während dieser Zyklen wurden vor allem Sulfate und Dolomite abgelagert. Die Bildung von Haliten erfolgte zu dieser Zeit nur noch in den tektonischen, durch höhere Subsidenzraten gekennzeichneten Grabenpositionen.

Nach diesen Beobachtungen kann das Sedimentbecken des Mittleren Muschelkalks auch als synsedimentäres Subsidenzbecken („Synsedimentary Subsidence Basin“ sensu SONNENFELD 1984) bezeichnet werden. EINSELE (1991) sieht diesen Beckentyp als eine Modifikation des flachen Barrenbeckens an. Mit diesem Beckentyp lassen sich auch die äußerst mächtigen Halite erklären. Innerhalb dieses halbgeschlossenen Beckens werden die Laugen in den randlichen Bereichen konzentriert und flie-

ßen, der Schwerkraft folgend, in die durch differentielle Subsidenz hervorgerufenen tieferen Beckenbereiche, wo dann die mächtigen Halitpakete zur Ablagerung gelangen.

8 ZYKLIZITÄT UND SEQUENZANALYSE

8.1 Sedimentationszyklen

Die Schichtenfolge des Muschelkalks besteht aus einem hierarchischen System ineinander geschachtelter Zyklen unterschiedlicher Größenordnung. Solche Sedimentationszyklen, die durch überregionale Ereignisse verursacht worden sind, eignen sich in besonderem Maße zu chronostratigraphischen Korrelationen mit einer hohen zeitlichen Auflösung und erlauben Parallelisierungen auch über Faziesgrenzen hinweg (TUCKER 1991, STROHMEIER et al. 1996). Ineinander geschachtelte Zyklizitäten wurden u. a. von AIGNER (1985), AIGNER & BACHMANN (1989), AIGNER et al. (1990) für den Hauptmuschelkalk, den Lettenkeuper und den Gipskeuper Süddeutschlands, von SIMON (1988) für den Mittleren Muschelkalk Süddeutschlands, von RÖHL (1988, 1993) für den Oberen Muschelkalk Nord- und Mitteldeutschlands, von KEDZIERSKI (1999) für den Unteren Muschelkalk Ostdeutschlands und Polens, von KLOTZ (1992) für den Unteren Muschelkalk Südosthessens und Mainfrankens sowie von KNAUST (1998) für den thüringischen Unteren Muschelkalk beschrieben.

Der Mittlere Muschelkalk repräsentiert die jeweilige Regressions- und Transgressionsphase zweier Zyklen 3. Ordnung, die nach BRANDNER (1984) Teile des 1. und 2. Triaszyklus darstellen und eine kurzzeitige Unterbrechung des generellen mitteltriadischen Transgressionszyklus hervorrufen.

Das Grundmuster der Zyklizität bilden im Unteren und Oberen Muschelkalk und in deren Übergangsbereichen zum Mittleren Muschelkalk kleinrhythmisich aufgebaut Wechselsefolgen von Kalken und Mergeln im cm-Bereich. Diese Rhythmite werden von einer Zyklizität im dm- bis m-Bereich überlagert. Meist sind diese Zyklen asymmetrisch. Sie können als Dachbankzyklen (oben-größer-Zyklen/„coarsening-upward“ oder „thickening-upward-cycles“), oder aber auch als Sohlbankzyklen (oben-feiner-Zyklen/„fining-upward-cycles“) ausgebildet sein.

Im Mittleren Muschelkalk wird das Zyklizitätsmuster von salinaren Zyklen geprägt. Ideale Salinarzyklen bestehen nach KRUMBEIN & SLOSS (1963) und HITE (1970) aus einem unteren regressiven Ast mit Gesteinen, die eine steigende Salinität nach oben hin anzeigen und einem oberen transgressiven Ast mit Gesteinen, die abnehmende Salinität anzeigen. Komplette Zyklen diesen Typs sind jedoch nicht sehr häufig, meist fehlt der obere transgressive Ast.

Milieu	Sedimente	Salinität %
„normal“ marin	fossilführende Kalke, Tonsteine usw.	35 - 140
schwach salinar	anhydritischer Dolomit und Anhydrit	140 - 250
salinar	Steinsalz und Anhydrit	>250
schwach salinar	anhydritischer Dolomit und Anhydrit	140 - 250
„normal“ marin	fossilführende Kalke, Tonsteine usw.	35 - 140

Tab. 9: Idealer Evaporit-Zyklus nach KRUMBEIN & SLOSS (1963)

Mit Dolomiten und dolomitischen Mergeln an der Basis, Salinargesteinen im mittleren Abschnitt und dolomitischen Mergeln bis Kalkmergeln im oberen Abschnitt ist der Mittlere Muschelkalk ein salinarer Großzyklus 3. Ordnung mit asymmetrischem Charakter (HAQ et al. 1987). Er wird durch 2 Sedimentationsphasen charakterisiert. Die erste Sedimentationsphase beginnt bereits im Unteren Mu-

schelkalk und weist einen regressiven Charakter auf. Zu ihr gehören im Unteren Muschelkalk der Wellenkalk 3 und der Bereich der Schaumkalkbänke sowie im Mittleren Muschelkalk die Zyklen 1 bis 4. Die anschließende transgressive Sedimentationsphase umfasst die Zyklen 5 bis 9 und reicht bis in den Oberen Muschelkalk.

Im Mittlerem Muschelkalk der Bohrung Remlingen 7 konnten zum einen salinar geprägte Kleinzyklen in der Heilbronn-Formation und zum anderen karbonatisch geprägte Kleinzyklen in der Karlstadt- und in der Diemel-Formation nachgewiesen werden.

Die im Mittleren Muschelkalk aufgrund lithologischer, fazieller und geochemischer Kriterien ausgeschiedenen Sedimentationszyklen werden im salinaren Schichtenabschnitt (Heilbronn-Formation, Zyklus 2 – 8) als Zyklus 4. Ordnung gedeutet, die von Zyklen höherer Ordnung überlagert sind (Abb. 60). Sie sind asymmetrisch aufgebaut und z. T. unvollständig ausgebildet, so dass sie lediglich einzelne Abschnitte eines idealen Evaporit-Zyklus repräsentieren.

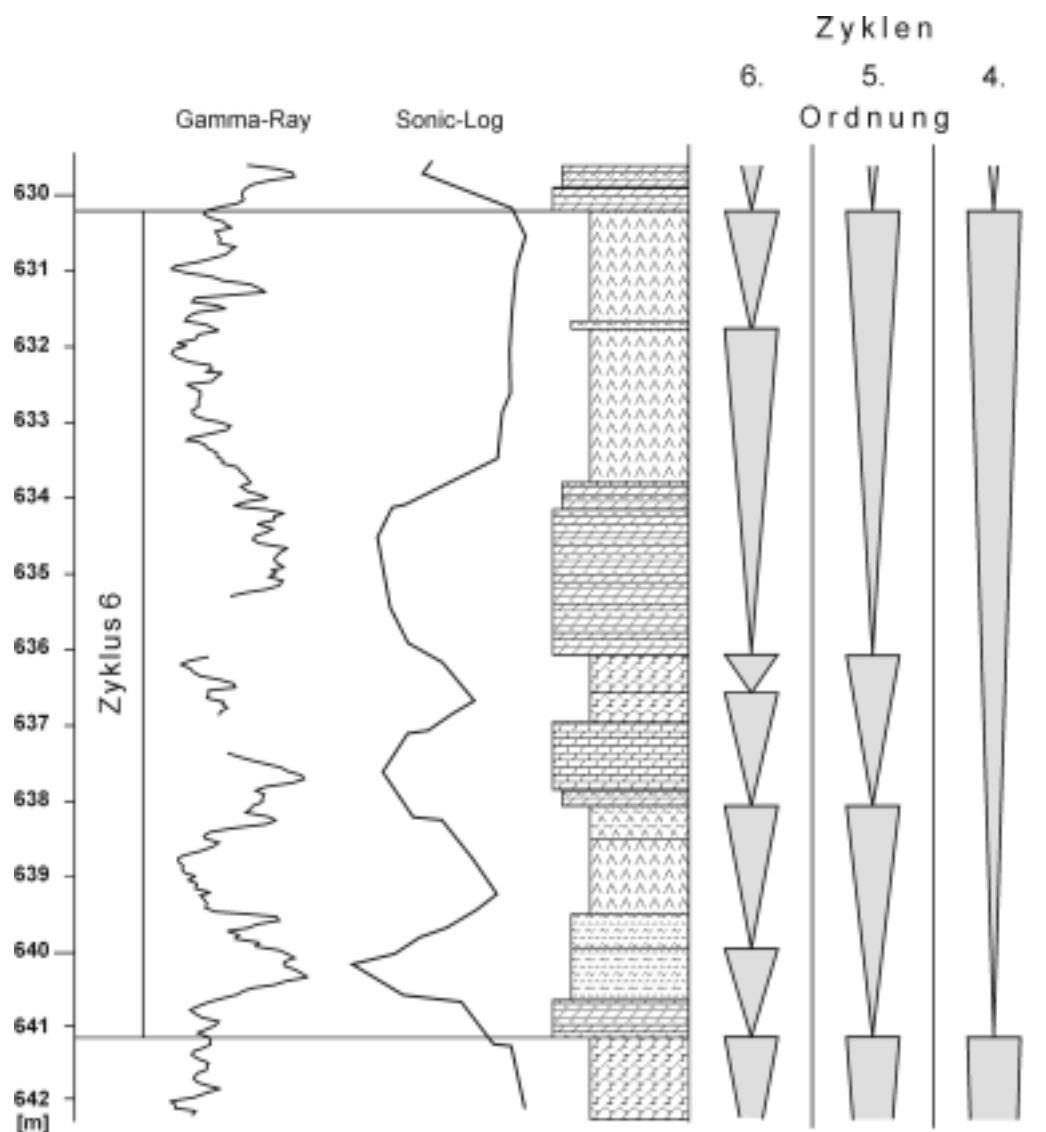


Abb. 60.: Hierarchisch gegliederte Zyklizität im Mittleren Muschelkalk der Bohrung Remlingen 7 am Beispiel des Zyklus 6; Details s. Anl. 2, Legende s. Anl. 4

In den karbonatisch geprägten Abschnitten des Mittleren Muschelkalks (Karlstadt- und Diemel-Formation) konnten in der Bohrung Remlingen 7 jeweils zwei Zyklen 4. Ordnung nachgewiesen werden. Diese Kleinzyklen lassen sich in den Gamma-Ray- und Sonic-Logs der anderen Bohrungen aufgrund ihres relativ einheitlichen lithologischen Aufbaus jedoch nur sehr schwer verfolgen, so dass sowohl die Karlstadt- als auch die Diemel-Formation zu jeweils einem Zyklus (1 bzw. 9) zusammengefasst wurden.

Die Zyklen 4. Ordnung umfassen Schichtabschnitte von einigen Metern bis zu max. 90 m. Die extrem hohen Mächtigkeiten konnten nur in den Zyklen beobachtet werden, in denen mächtige Steinsalzpakete zur Ablagerung kamen. Ursache ist die deutlich höhere Sedimentationsrate der Evaporite im Vergleich zu flachmarinen Karbonaten und Anhydriten. Die Zyklen 4. Ordnung lassen sich aufgrund charakteristischer Logbilder in den Gamma-Ray- und Sonic-Log-Kurven problemlos identifizieren und auch beckenweit korrelieren. In der Bohrung Remlingen 7 sind die Zyklen 4. Ordnung als regressive „shallowing-upward“-Zyklen ausgebildet (Anl. 1 - 4).

Ein typischer salinarer Kleinzyklus ist im Allgemeinen asymmetrisch und beginnt an der Basis mit Dolomiten/Dolomitmergeln, die in Anhydrite übergehen und mit Halit enden (Abb. 11, 61). In der Regel sind jedoch die Zyklen 4. Ordnung im des Mittleren Muschelkalk nicht ideal ausgebildet bzw. sie sind unvollständig. Sie können innerhalb der salinaren Abscheidungsfolge in unterschiedlichen Abschnitten beginnen bzw. enden. So setzen einzelne Zyklen z. B. erst mit der Sulfatentwicklung ein, während andere bereits mit sulfatführenden Dolomiten enden. In Anlehnung an KENDALL (1992) werden solche Salinarzyklen alternativ als „brining-upward-Evaporit-Zyklen“ – subaquatisch gebildete Zyklen mit höher salinaren Gesteinen oben – bezeichnet. Innerhalb dieser Zyklen ist eine Abnahme der Wassertiefe oft nicht eindeutig nachzuweisen, aber wahrscheinlich.

In den mehr karbonatisch geprägten Zyklen dominieren von unten nach oben dolomitische Biopel-mikrite (Wackstone), mikritische Dolomite, Algenlaminiten, Algenlaminiten mit Gips und Dolosiltlaminiten. Diese „shallowing-upward“-Zyklen repräsentieren inter- bis supratidale Ablagerungsbereiche.

Alternativ können die Kleinzyklen 4. Ordnung auch als Parasequenzen oder als hochfrequente Sequenzen („high frequency sequences“, HFS; MITCHUM & VAN WAGONER 1991) interpretiert werden.

Parasequenzen sind relativ konforme Schichteinheiten, die durch marine Überflutungsflächen begrenzt werden und Verflachungszyklen darstellen. Im flachmarinen Ablagerungsmilieu zeigt die Untergrenze einer Parasequenz eine schnelle Überflutung oder eine plötzliche Zunahme der Wassertiefe an. Die als Parasequenzen gedeuteten Zyklen 4. Ordnung weisen Mächtigkeiten von einigen Metern bis Zehnermetern auf und werden von Dolomit an der Basis, Anhydrit im mittleren Teil und Halit am Top der Sequenz aufgebaut (Abb. 61). Sie besitzen einen transgressiv-regressiven, „brining-upward“ - „shallowing-upward“ Trend.

Während Parasequenzen durch marine Überflutungsflächen begrenzt werden, werden hochfrequente Sequenzen vor allem durch Sequenzgrenzen, d. h. durch Erosions- oder Nicht-Sedimentationsflächen („unconformities“) oder deren korrelierbaren Konkordanzflächen („correlative conformities“) definiert. Im Mittleren Muschelkalk werden die HFS-Sequenzgrenzen an der Basis der Halithorizonte gezogen, die in ihrer gesamten Mächtigkeit dem HFS-Tiefstand-Systemtrakt zugerechnet werden. Lamierte, mikritisch dolomitische Mudstones mit z.T. erheblichem Mergelanteil repräsentieren den HFS-Transgressiven Systemtrakt. Diese werden von Anhydriten überlagert, die den Hochstand-Systemtrakt bilden. In Anlehnung an WARREN (1999) erscheint es alternativ auch möglich, einen unteren Teil der Halite als „halite start-up phase“ dem jeweiligen HFS-Tiefstand-Systemtrakt sowie einen oberen Teil als „halite keep-up phase“ dem HFS-Transgressiven Systemtrakt zuzuordnen. Diese Interpretation ließe sich jedoch nur durch eine weitere detaillierte Bearbeitung der einzelnen Salinarzyklen präzisieren. Die als Parasequenzen oder hochfrequente Sequenzen

interpretierten Kleinzyklen 4. Ordnung zeigen demnach alle charakteristischen Merkmale von Sequenzen im Sinne der Sequenzstratigraphie (u. a. VAN WAGONER et al. 1988).

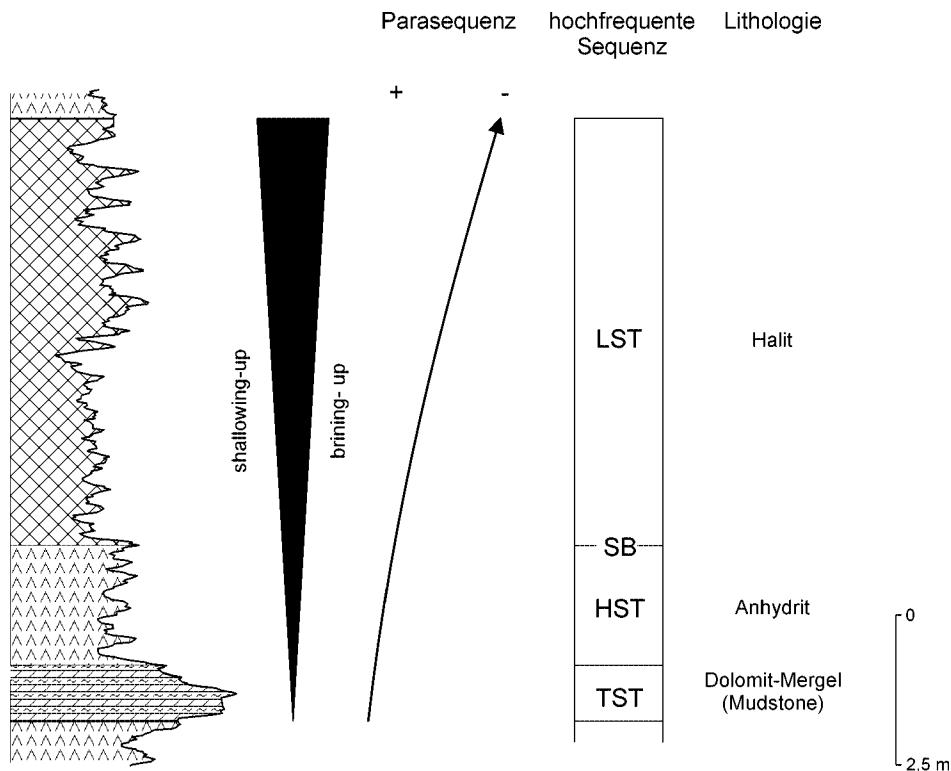


Abb. 61: Interpretation eines salinaren Kleinzyklus alternativ als Parasequenz oder als Hochfrequente Sequenz (HFS)

Im karbonatisch ausgebildeten Abschnitt des Mittleren Muschelkalks werden sowohl die Karlstadt-Zyklus 1) als auch die Diemel-Formation (Zyklus 9) von jeweils zwei Parasequenzen aufgebaut, die ebenfalls als hochfrequente Sequenzen interpretieren werden können. Innerhalb dieser karbonatischen Parasequenzen ist die HF-Sequenzgrenze meist undeutlich, teilweise aber auch als Emersionsfläche ausgebildet (Anl. 1, Kap. 5.4.3). Darüber folgen Sedimente des HFS-Transgressiven Systemtrakts, bio- und intraklastreiche Dolomite. Den HFS-Hochstand-Systemtrakt bilden Dolomikrite, Algenlaminate, Algenlaminate mit Gips und Dolosiltlaminite. Am Top der zweiten Parasequenz der Karlstadt-Formation konnten Sabkha-Anhydrite nachgewiesen werden. Nach HANDFORD & LOUKS (1993) und ALSHARAN & KENDALL (1994) sind diese typisch für den späten HFS-Hochstand-Systemtrakt.

Die Parasequenzen bzw. die Zyklen 4. Ordnung bestehen jeweils aus einer Reihe von Kleinzyklen 5. Ordnung. Diese Zyklen 5. Ordnung erreichen in der Regel Mächtigkeiten von ca. 1 - 2 m. Sowohl in den salinaren als auch in den karbonatischen Schichtabschnitten sind sie in charakteristischer Weise ausgebildet. Während in den halitbetonten Schichten der Heilbronn-Formation Zyklen mit Anhydritten bzw. stark anhydritisch verunreinigten Haliten an der Basis sowie Haliten am Top charakteristisch sind, sind für die niedriger salinaren Abschnitte Abfolgen von Dolomit/Dolomitmergeln an der Basis und Anhydrit am Top kennzeichnend. Somit zeigen diese Zyklen ähnlich den Zyklen 4. Ordnung einen „brining-upward“-Trend. Als Ursache werden kurzzeitige Zuflüsse normal marinen Meerwassers angesehen, die zu einer Herabsetzung der Salinität an der Basis der Zyklen führen. In den karbonatischen Schichtabschnitten sind rhythmische Entwicklungen von dolomitischen Mergeln zu Dolomiten charakteristisch, die deutlich laminiert sein können und Intraklasten führen können. Die Zyklen 5. Ordnung lassen sich meist gut im Gamma-Ray- und Sonic-Log verfolgen. Typisch sind

erhöhte Gammastrahlung und erhöhte Schall-Laufzeiten im unteren Abschnitt eines Zyklus sowie deutlich niedrigere Strahlung und Laufzeiten im oberen Abschnitt (Abb. 60).

Die Kleinzyklen 5. Ordnung bestehen wiederum aus einer Reihe von Kleinzyklen 6. Ordnung. Diese haben Mächtigkeiten im dm-Bereich und entsprechen in ihrer lithologischen Ausbildung den Zyklen 5. Ordnung.

Die einfachste Form rhythmischer Wechsellagerungen ist im Mittleren Muschelkalk in den salinaren Abschnitten durch einen Wechsel von Anhydrit und Dolomit sowie in den karbonatisch geprägten Abschnitten durch den Wechsel von Dolomiten und Dolomitmergeln gekennzeichnet. Zu diesen Rhythmen gehören in der Karlstadt- und Diemel-Formation cm-mächtige Dolomitlagen, die auf kurzzeitige Sturmereignisse zurückgeführt werden. Millimeter-mächtige gradierte Anhydritlagen bilden in der Heilbronn-Formation den Großteil der Anhydrit-Dolomit-Wechsellagerungen. Die Anhydritlagen weisen eine scharfe Basis auf und zeigen eine graduelle Abnahme von Anhydriteisten nach oben. Der untere Teil der Lage ist kompakt ausgebildet, häufig sind die Anhydriteisten schichtparallel eingeregelt. Nach oben steigt der Dolomitmergelanteil stetig, bis schließlich einzelne Anhydriteisten in dolomitischer Matrix schwimmen (Taf. 36/9). Solche graduierten Anhydritlagen entstehen bei kurzzeitiger Sulfatübersättigung, die zu einer plötzlichen Ausfällung von Sulfat führt, dann aber rasch wieder abklingt und letztendlich auch aussetzen kann.

Zusammenfassend stellt sich die zyklische Entwicklung des Mittleren Muschelkalks wie folgt dar.

Im Zyklus 1 des Mittleren Muschelkalks setzt sich die regressive Tendenz des Unteren Muschelkalk fort. Im Kern der Bohrung Remlingen 7 konnten zwei „shallowing-upward“-Zyklen 4. Ordnung nachgewiesen werden (Anl. 4). Die Abfolge ist durch Karbonate gekennzeichnet. Im ersten Zyklus dominieren feinkörnige Dolomite und Dolomitmergel des flachen Sub- bis Intertidals, im zweiten Zyklus feinlaminierte Dolomite und Algenlaminate des Inter- bis Supratidals. Anhydrit tritt in beiden Zyklen nur als spätdiagenetische Bildung in Form von Anhydriteisten und -knoten auf. Im obersten Bereich wurde eine „chicken-wire“-Lage nachgewiesen, die ein Sabkha-Milieu anzeigt.

Die nachfolgenden Zyklen 2 – 8 bestehen jeweils aus Zyklen 4. Ordnung (Anl. 1-4). Ein typischer Kleinzyklus 4. Ordnung ist auf Seite 39 beschrieben (s. a. Abb. 11).

Der Zyklus 2 wird von unten nach oben aus mergeligem Dolomit, einem Dolomit-Anhydrit-Laminat sowie einem massigen Anhydrit aufgebaut.

Während an der Basis des Zyklus 2 noch ein geringmächtiger Dolomitmergel ausgebildet, so ist die Basis des Zyklus 3 bereits durch einen anhydritischen Dolomitmergel gekennzeichnet. Den Top des Zyklus 3 bilden mächtige Steinsalze. In dem darüber folgenden Zyklus 4 beginnt der Salinarzyklus mit Sulfaten und endet wiederum mit Steinsalzen. Diese basalen Sulfate zeigen gegenüber den basalen Sedimenten der beiden vorhergehenden Zyklen nur noch einen kurzzeitigen marinen Impuls an. Somit bilden die Zyklen 2 - 4 regressive „shallowing-upward“-Zyklen, bei denen sich der Fuß der einzelnen Zyklen 4. Ordnung zu immer höherer Salinität hin verschiebt. Die Zyklen 2 – 4 repräsentieren die maximale Evaporitentwicklung im Mittleren Muschelkalk.

Mit Beginn des Zyklus 5 sind die Zeiten maximaler Evaporitentwicklung vorbei. Den höheren Teil des Mittleren Muschelkalks mit den Zyklen 5 – 9 kennzeichnet eine rezessive Evaporitabfolge von sulfatdominierten zu karbonatdominierten Ablagerungen.

Die Zyklen 5 - 8 bestehen aus einer Übereinanderstapelung von „regressiven“ „shallowing-upward“-Zyklen 5. Ordnung. Diese Zyklen 5. Ordnung zeichnen sich durch den Wechsel von dolomitischer zu sulfatischer Evaporitfazies aus. In der Bohrung Remlingen 7 treten im Zyklus 5 Brekzien auf, die möglicherweise Anzeichen für ehemals vorhandene geringmächtige Halitbildungen sein können.

Der Zyklus 9 umfasst den obersten Bereich des Mittleren Muschelkalks, die Diemel-Formation. Sie wird von zwei Dachbankzyklen (4. Ordnung) in Karbonatfazies aufgebaut (Anl.1). In einem solchen Dachbankzyklus folgt über einem basalen, cm- bis wenige dm-mächtigen Mergelstein zunächst ein Dolomitmergelstein, teilweise in Wechsellagerung mit Mergelsteinen, wobei der Dolomitgehalt zum Hangenden hin kontinuierlich ansteigt und im oberen Abschnitt schließlich ein mergeliger Dolomit bis Dolomit entwickelt ist. Solche Dachbankzyklen stellen damit typische „coarsening-upward“-Zyklen dar.

Wie bereits oben erwähnt, bauen sich die Zyklen 4. Ordnung aus mehreren Zyklen 5. Ordnung auf. Der oberste Kleinzyklus 5. Ordnung des Mittleren Muschelkalks beginnt in der Bohrung Remlingen 7 mit einem dolomitischen Kalkmergelstein, seinen Abschluss findet er in einer ca. 7 cm mächtigen Kalkbank. Diese Bioklastitbank repräsentiert gleichzeitig jedoch die lithostratigraphisch definierte Basis der Trochitenkalk-Formation. Damit liegt die Grenze zwischen Mittleren und Oberen Muschelkalk innerhalb eines Kleinzyklus 5. Ordnung, sie stellt zwar eine lithologische, aber keine Zyklen-Grenze dar!

Der über der basalen Bioklastitbank des Oberen Muschelkalk folgende, nächste Kleinzyklus 5. Ordnung der Trochitenkalk-Formation beginnt mit dolomitischen Kalkmergeln, denen Knauerkalke folgen und endet mit einer massigen Karbonatbank. Die weiteren Kleinzyklen beginnen jeweils mit einer bis max. 10 cm mächtigen grauen Tonmergelsteinlage, nach oben schließen sich dann Oolithkalke an, die jeweils den Top eines „coarsening-upward“-Zyklus bilden. Auf Grund der zunehmenden Mächtigkeit der jeweiligen Karbonatbänke wird auf eine zyklische Zunahme der Wasserenergie geschlossen. Ähnliche „coarsening-upward“-Zyklen wurden bereits von AIGNER (1985) aus dem Oberen Muschelkalk Süddeutschlands beschrieben.

Nach den vorliegenden Beobachtungen stellen die einzelnen Zyklen unterschiedlicher Rangordnung im Mittleren Muschelkalk demzufolge progressive Abfolgen dar, die ein generelles Flacherwerden nach oben anzeigen. Diese Reduzierung der Wassertiefe gegen oben kann sowohl mit einem Absinken des Meeresspiegels erklärt werden als auch durch eine gegenüber der Subsidenz erhöhte Sedimentationsrate der karbonatisch-evaporitischen Gesteine.

8.2 Sequenzstratigraphie

8.2.1 Terminologie

Die Karbonatsedimentation wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Von entscheidender Bedeutung für die Entwicklung von Sedimentbecken und ihren Ablagerungen sind jedoch Tektonik und Klima, der von diesen beiden Faktoren kontrollierte Meeresspiegel sowie die Art und Menge des eingebrachten Sediments (VAIL et al. 1991; SCHLAGER 1991). Tektonik und eustatische Veränderungen beeinflussen den für die Sedimente verfügbaren Ablagerungsraum, klimatische Prozesse kontrollieren im Zusammenspiel mit der Tektonik die abgelagerten Sedimentarten (VAIL et al. 1991).

Sequenzstratigraphische Konzepte werden zur Identifizierung genetisch zusammenhängender Schichtenfolgen und ihrer Begrenzungen herangezogen. Die Grundeinheit der Sequenzstratigraphie ist eine Sequenz, eine Abfolge genetisch zusammenhängender Schichten, die an der Basis und am Top von Diskordanzflächen (Erosionsflächen oder Hiati) bzw. von damit korrelierenden konkordanten Flächen begrenzt werden (MITCHUM 1977). Sequenzen können sowohl in Aufschlüssen und geophysikalischen Logs als auch bei entsprechenden Mächtigkeiten in seismischen Sektionen identifiziert werden. Sequenzgrenzen lassen sich beckenweit verfolgen und zeichnen sich durch signifikante Fazieswechsel aus. Im Allgemeinen stellen Sequenzgrenzen regionale „Onlap“-Flächen dar. In Beckenbereichen werden sie durch ein Übergreifen von Sedimenten, progradierende Deltas, Karbonatplattform-Ablagerungen oder Evaporiten charakterisiert. In flachmarinen oder auch

nichtmarinen Milieus werden sie gekennzeichnet durch das Übergreifen von Schichtenfolgen, die im peritidalen Milieu von Karbonatplattformen gebildet wurden, von Schichten des Sabkha-Milieus oder von flachen subaquatischen Evaporiten (SARG 1988).

Jede Ablagerungssequenz setzt sich aus Systemtrakten zusammen, die durch ihre Position innerhalb einer Sequenz definiert werden. Sie entstehen während verschiedener Stadien des Meeresspiegelstandes und stellen somit eine Kombination zeitgleicher Ablagerungssysteme dar (BROWN & FISHER 1977), die als eine dreidimensionale Gemeinschaft von Lithofaziestypen gedeutet werden (FISHER & McGOWAN 1967).

Die einzelnen Teile einer Sequenz werden als Tiefstand-Systemtrakt (Lowstand Systems Tract, **LST**), Transgressiver Systemtrakt (Transgressive Systems Tract, **TST**) und Hochstand-Systemtrakt (Highstand Systems Tract, **HST**) bezeichnet. Die Grenze zwischen LST und TST bildet der Transgressive Horizont (Transgressiv Surface, **ts**), die zwischen TST und HST die maximale Überflutungsfläche (Maximum Flooding Surface, **mf_s**). Die Systemtrakte werden von Parasequenzen und Parasequenz-Sets aufgebaut, die jeweils von marinen Überflutungsflächen (Marine Flooding Surfaces, **mf**) oder ihren lateralen Vertretungen begrenzt werden (VAN WAGONER et al. 1988).

Während die Ablagerung mariner Plattformrand-Evaporite mit dem globalen Meeresspiegel in Zusammenhang zu bringen ist, werden mächtige Beckenevaporite meist nicht auf Schwankungen des Meeresspiegels zurückgeführt. Sie werden oft als das Resultat einer tektonischen Isolation eines Gebietes angesehen, bei denen es zu einer Unterbrechung des direkten Zuflusses ozeanischer Wässer kommt (WARREN 1999). Es wird davon ausgegangen, dass Meeresspiegelschwankungen im Dekameter-Bereich außerhalb evaporitischer Becken nur einen relativ geringen Einfluss auf die Hydrologie in isolierten Becken ausüben. Die Sedimentation innerhalb dieser isolierten Becken wird als autozyklisch angesehen. Kommt es zu einer Verbindung mit den Weltozeanen, reflektieren die karbonatischen Schichtkomplexe eine eustatische Kontrolle.

In jüngerer Zeit wird neben diesem sequenzstratigraphischen Ansatz auch das „Baselevel“-Konzept (Erosionsbasis-Konzept; WHEELER 1964, CROSS & LESSENGER 1998) diskutiert. Während das sequenzstratigraphische Konzept für marine Bildungen an passiven Kontinentalrändern entwickelt wurde, lässt sich das „baselevel“-Konzept besser auf klastische Serien epikontinentaler Becken anwenden. Nach AIGNER et. al. (1999) sind in diesen epikontinentalen Ablagerungen u.a.:

- Systemtrakte oft nicht deutlich entwickelt,
- der typische Tiefstand-Systemtrakt fehlt,
- Sequenzgrenzen nicht immer eindeutig zuzuordnen,
- Kontrollfaktoren stratigraphischer Zyklen (Klima, Tektonik und Eustasie) sehr schwierig zu ermitteln.

Der „Baselevel“ betrachtet das Verhältnis der zeitlichen Veränderung des Akkommmodationsraumes und der Sedimentzufuhr. Bei einem „baselevel“-Anstieg kann zunehmend sedimentiert werden, während bei einem „baselevel“-Abfall das Sediment weiter transportiert wird. Wird der Akkommmodationsraum negativ, findet Erosion statt. Die „baselevel“-Wendepunkte können als Bindeglied zwischen dem „baselevel“-Konzept und der Sequenzstratigraphie fungieren. An diesen Wendepunkten ändert sich der Baselevel bzw. Meeresspiegel am schnellsten. Dabei entspricht der Wendepunkt zwischen Anstieg und Abfall der maximalen Überflutungsfläche, der Wendepunkt zwischen Abfall und Anstieg dem Transgressiven Horizont, wobei letzterer mit der Sequenzgrenze assoziiert sein kann (AIGNER et. al. 1999). Erste Untersuchungen in der Trias Süddeutschlands haben gezeigt, dass die nach dem „Baselevel“-Konzept definierten Makrozyklen (AIGNER et. al. 1999) mit den Sequenzen 3. Ordnung von BACHMANN & Aigner (1992) korrespondieren.

Aufgrund der marinen Ausbildung und des Fehlens bedeutender Erosionsdiskordanzen wird für den Muschelkalk des Mitteleuropäischen Beckens das klassische sequenzstratigraphische Konzept bevorzugt.

8.2.2 Sequenzstratigraphisches Konzept für den Mittleren Muschelkalk

In den bisherigen Untersuchungen zum salinaren Mittleren Muschelkalk ist man davon ausgegangen, dass es sich um beckenzentrale epikontinentale Evaporitbildungen handelt. Voraussetzung für derartige Bildungen ist ein restriktions bzw. vollständig isoliertes Becken. Die Sedimente wurden als Bildungen eines Tiefstand-Systemtrakts interpretiert. Die hier durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die Evaporite in einem halbgeschlossenen, marinen Evaporit-Randbecken abgelagert wurden (s. Kap. 7).

Die germanische Trias bildet einen Transgressions/Regressions-Zyklus 2. Ordnung sensu DUVAL et al. (1992). Unterer, Mittlerer und Oberer Muschelkalk lassen sich nach AIGNER & BACHMANN (1992) zwei Ablagerungssequenzen (M1, M2) zuordnen, die nach HAQ et al. (1987) Zyklen 3. Ordnung darstellen.

Die erste Sequenz des Muschelkalks (M1) umfasst dabei Teile des Röts, den Unteren Muschelkalk und reicht bis in den Mittleren Muschelkalk (Abb. 1). Der Transgressive Systemtrakt erstreckt sich vom Oberen Röt (Oberer Buntsandstein) bis zum Mittleren Wellenkalk. Im Bereich der Terebratellbänke erreicht der Meeresspiegel seinen Höchststand, die maximale Überflutungsfläche liegt in diesem stratigraphischen Bereich. Der Obere Wellenkalk und die Schaumkalkbänke bauen den Hochstand-Systemtrakt auf, der bis in den Mittleren Muschelkalk reicht. Die folgende Sequenzgrenze wird durch den Wechsel vom Hochstand-Systemtrakt zum Tiefstand-Systemtrakt definiert, d.h. durch den Wechsel von der Karbonatfazies zur Salinarfazies (AIGNER & BACHMANN 1992).

Im Gegensatz dazu untergliedern KEDZIERSKI (1999) und SZULC (1999, 2000) den Unteren Muschelkalk in mehrere weitere Sequenzen 3. Ordnung. Die erste Sequenz (An2 nach SZULC 2000) mit der Sequenzgrenze am Top des Grenzgelbkalks (SZULC 2000) bzw. an der Basis des Grenzgelbkalks (KEDZIERSKI 1999) erstreckt sich bis in den Mittleren Wellenkalk. Während SZULC die zweite Sequenz des Unteren Muschelkalks (An3), deren Sequenzgrenze sich am Top der Oolithbänke befindet, bis in den Mittleren Muschelkalk reichen lässt, sieht KEDZIERSKI an der Basis der unteren Schaumkalkbank $\chi 1$ eine weitere Sequenzgrenze. Diese oberste Sequenz des Unteren Muschelkalks beginnt mit einem kurzen Transgressiven Systemtrakt bis zur Basis der Schaumkalkbank $\chi 2$. Darüber folgt der Hochstand-Systemtrakt, der ebenfalls bis in den Mittleren Muschelkalk reicht.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen belegen eine Zuordnung des Bereichs der höchsten Jena-Formation mit den Schaumkalkbänken und der Karlstadt-Formation zum späten Hochstand-Systemtrakt der ersten Muschelkalksequenz. Oolithische und peloidale Sedimente im Bereich der Schaumkalkbänke, sowie eine Dolomitisierung dieser Schichten zeigen ebenso wie das inter- bis supratidale Ablagerungsmilieu der Sedimente der Karlstadt-Formation einen regressiven Trend innerhalb des späten Hochstand-Systemtrakts an. Dieser Trend wird weiterhin deutlich durch eine markante Reduktion des marinen Phytoplanktons, insbesondere durch das Verschwinden der Acritarchen, an der Grenze Unterer/Mittlerer Muschelkalk. Im Zyklus 1 (Karlstadt-Formation) nimmt das marine Phytoplankton und der Fossilinhalt weiter ab und setzt diesen Trend fort.

Mit dem Zyklus 2 kam es zu markanten Veränderungen im sedimentären Regime des Mittleren Muschelkalks. Bedingt durch einen deutlichen Abfall des Meeresspiegels kommt es zu einer Abschnürung des Muschelkalkbeckens, wobei tektonische Bewegungen vermutlich eine bedeutende Rolle spielen (u. a. SZULC 2000). Unter ariden Klimabedingungen stellten sich sehr schnell hypersalinare Bedingungen ein. Neben tektonischen Einflüssen, die zur Isolation des Mitteleuropäischen Beckens und somit zur Ausbildung eines Tiefstand-Systemtrakts geführt haben können, findet sich global innerhalb dieses Zeitabschnitts ebenfalls ein generell regressiver Trend, z.B. im nordalpinen (RÜFFER 1995), südalpinen (DE ZANCHE et al. 1993), westmediterranen (CALVET et al. 1990, LOPEZ-GOMEZ et al. 2000) und ostmediterranen Raum (HIRSCH 1992), sowie am westlichen Tethysrand (COUREL et al. 1992).

Die M2-Sequenzgrenze ist im Vergleich zu anderen Sequenzgrenzen in der Trias relativ schwierig zu fassen. Nach dem jetzigen Kenntnisstand scheint es sich bei dieser Sequenzgrenze zumindest im Norddeutschen Becken um eine mehr oder weniger konkordante, quasi-isochrone Grenze zu handeln. Größere, in den Bohrlochmessungen erkennbare Schichtlücken konnten selbst auf den beckeninternen Hochlagen wie der Eichsfeld-Altmark-Schwelle oder der Hunte-Schwelle (Anl. 10) bisher nicht nachgewiesen werden. Dies gilt auch für die Kernbohrung Remlingen 7, die paläogeographisch gesehen im Bereich der Eichsfeld-Altmark-Schwelle liegt. Hinweise auf Schichtausfälle und eine diskordante Ausbildung dieser Sequenzgrenze liegen auch aus den beckenrandlichen Ablagerungsräumen bisher nicht vor. Im Gegensatz dazu stehen die Sequenzgrenzen der Unteren und Oberen Trias des Mitteleuropäischen Beckens, die nicht nur auf beckeninternen Hochlagen sondern teilweise selbst im zentralen Becken durch markante Erosionsdiskordanzen mit z. T. großen Schichtlücken gekennzeichnet sind. Hier sind u. a. die V-, D- und H-Diskordanz im Mittleren Buntsandstein oder die Diskordanzen im Keuper, wie z. B. die altkimmerische Hauptdiskordanz, zu nennen.

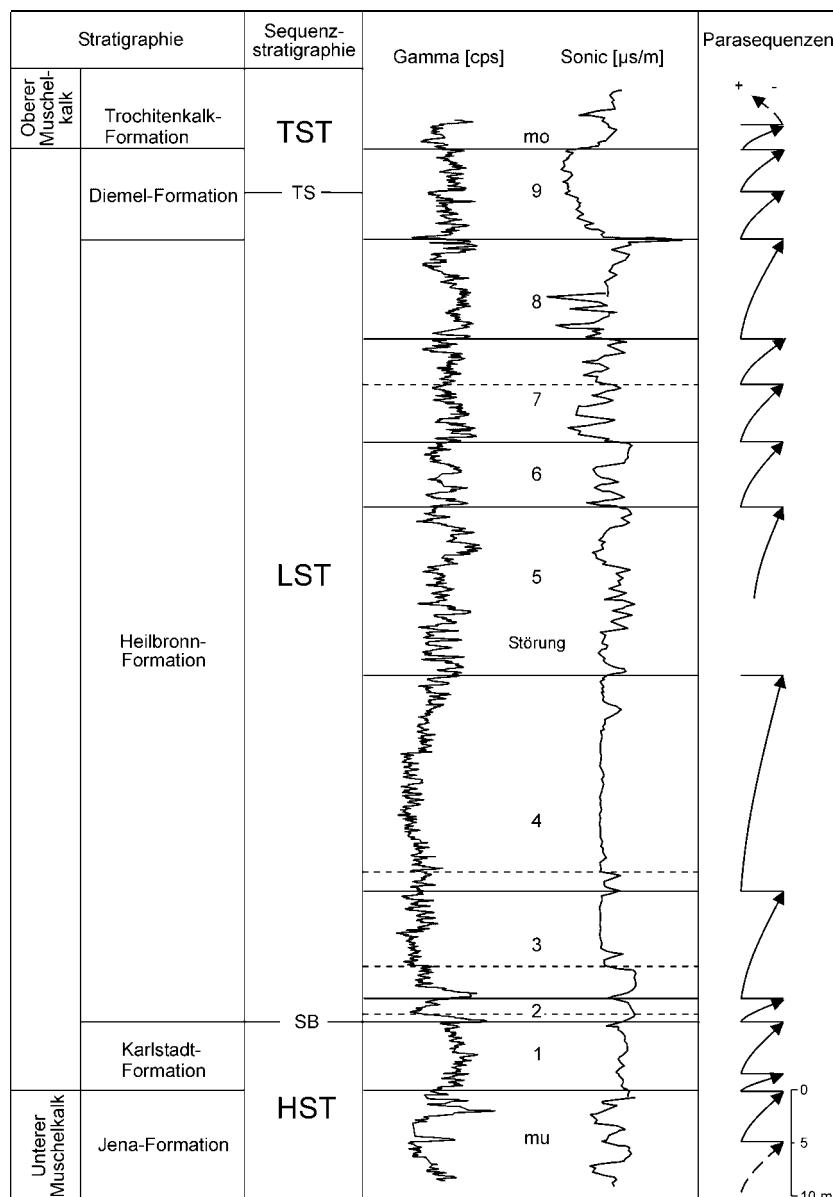


Abb. 62: Sequenzstratigraphische Interpretation des Mittleren Muschelkalks in der Bohrung Remlingen 7

In den randlicher gelegenen Teilen des Norddeutschen Beckens treten Halite erst mit dem Zyklus 3 auf (s. a. Bohrung Remlingen 7). Durch Korrelationen mit dem zentralen Norddeutschen Becken kann jedoch gezeigt werden die Basis des Zyklus 2 durch einen regional markanten, weit aushaltenden, laminierten Dolomitmergel definiert ist. Dieser Dolomitmergel markiert den Beginn der Beckenisolierung und ist über den zentralen Beckenbereich hinaus überregional zu verfolgen. Dieser Horizont, der in Nordostdeutschland auch als Fischmergel bezeichnet wird, ist in den geophysikalischen Bohrlochmessungen durch ein charakteristisches Logbild mit deutlichen Ausschlägen hoher Gammastrahlung und hoher Schall-Laufzeiten gekennzeichnet (Abb. 62, 63). Über Logkorrelationen kann dieser markante Leithorizont auch in die beckenrandlichen Bereiche verfolgt werden. Im Beckenzentrum treten darüber bereits mächtige Steinsalzlagen auf. Diese salinaren Horizonte greifen aus dem Becken heraus immer weiter in Richtung Beckenränder über. Daher wird die Basis des Zyklus 2 als M2-Sequenzgrenze angesehen, da hier erstmals im Mittleren Muschelkalk mächtige, subaquatisch gebildete Sulfate und Halite vorkommen (Abb. 63).

Oberhalb der M2-Sequenzgrenze ist die Schichtenfolge durch subaquatisch gebildete salinare Dolomite, Gipse/Anhydrite und Halite gekennzeichnet. Diese werden dem Tiefstand-Systemtrakt zugeordnet (Abb. 64). Die in den Zyklen 3 und 4 auftretenden mächtigen Halithorizonte weisen auf eine eingeschränkte Öffnung der Verbindungswege zur Tethys über die Ostkarpaten-Pforte und die Schlesisch-Mährische Pforte hin. Denn obwohl zur Ablagerung mächtiger Steinsalzhorizonte große Mengen an Meerwasser benötigt werden, muss der Zustrom an Meerwasser während der Bildung der Evaporite zeitweilig reduziert gewesen sein, um zu verhindern, dass die Laugen nicht fortlaufend verdünnt werden. Für den Tiefstand-Systemtrakt wird davon ausgegangen, dass während der Ablagerung mächtiger Halithorizonte reduzierte Zuflüsse möglich und Rückflüsse von hochkonzentrierten Laugen stark eingeschränkt waren.

Die obere Begrenzung eines Tiefstand-Systemtrakts wird durch den „Transgressiven Horizont“ gebildet. In den randlicher gelegenen Teilen des Norddeutschen Beckens scheint dieser „Transgressive Horizont“ an der Basis des Zyklus 5 ausgebildet zu sein, da in diesem Bereich eine deutliche Abnahme der Salinität zu beobachten ist. Erstmals gelangen wieder mächtigere Karbonate zur Ablagerung (Mittlerer Dolomit, Mittleres Karbonat u. a. nach SEIDEL 1964, FRIEDEL 1988, ZWENGER 1993). In den in beckenzentraleren Bereichen abgeteuften Bohrungen konnten mächtige Karbonate nicht eindeutig nachgewiesen werden. Nach geophysikalischen Bohrlochmessungen und Spülprobenbeschreibungen gelangten überwiegend Anhydrite zur Ablagerung. In der Bohrung Remlingen ist dieser Schichtabschnitt gestört, so dass genauere Aussagen nicht möglich sind. Diese an der Basis des Zyklus 5 zu beobachtende Salinitätserniedrigung wird auf eine wohl tektonisch induzierte Öffnung eines zusätzlichen südwestlichen Verbindungsweges zur Tethys sowie einen regelmäßigen Laugenrückfluss in den offenen Ozean zurückgeführt, so dass diese Schichtenfolge ebenfalls noch dem Tiefstand-Systemtrakt zugeordnet wird. Dafür spricht auch, dass in den beckenzentraleren Teilen des Norddeutschen Beckens im Zyklus 5 noch mächtige Halite auftreten.

Im oberen Teil der Heilbronn-Formation (Zyklen 6 – 8) spiegeln „shallowing-upward“-Zyklen einen langsamen Anstieg des relativen Meeresspiegels wider. Steinsalze werden in den Zyklen 6 und 7 nur noch in wenigen tektonisch bedingten Subsidenzzentren abgelagert. Die Laugen werden in den allgemein flachen Bereichen vorkonzentriert und fließen in die tiefen Beckenbereiche, wo das Steinsalz abgeschieden wird. Palynologisch lässt sich in der Bohrung Remlingen 7 im unteren Abschnitt des Zyklus 9 ein Regressionsmaximum nachweisen. Kennzeichnend dafür ist ein gehäuftes Vorkommen der mehrzelligen Grünalge *Botryococcus* sp. bei sonst starker Fossilarmut. Dieser Bereich dürfte somit einen hypersalinär/lagunären Wasserchemismus mit deutlichem Süß- und Brackwassereinfluss repräsentieren. Oberhalb dieses Regressionsmaximums kommt es, wohl infolge tektonischer Prozesse, zu Verbindungen mit der Tethys. Das Norddeutsche Becken wird zunehmend vollmarin und ein karbonatischer Transgressiver Systemtrakt entsteht. Der „Transgressive Horizont“ wird durch das erste Einsetzen mariner Fauna, insbesondere von Acritarchen, definiert und liegt in der

Bohrung Remlingen 7 ca. 6,5 Kernmeter unterhalb der Basis der Trochitenkalk-Formation (Abb. 17). Der Transgressive Systemtrakt umfasst somit den oberen Teil der Diemel-Formation und reicht bis in die Trochitenkalk-Formation.

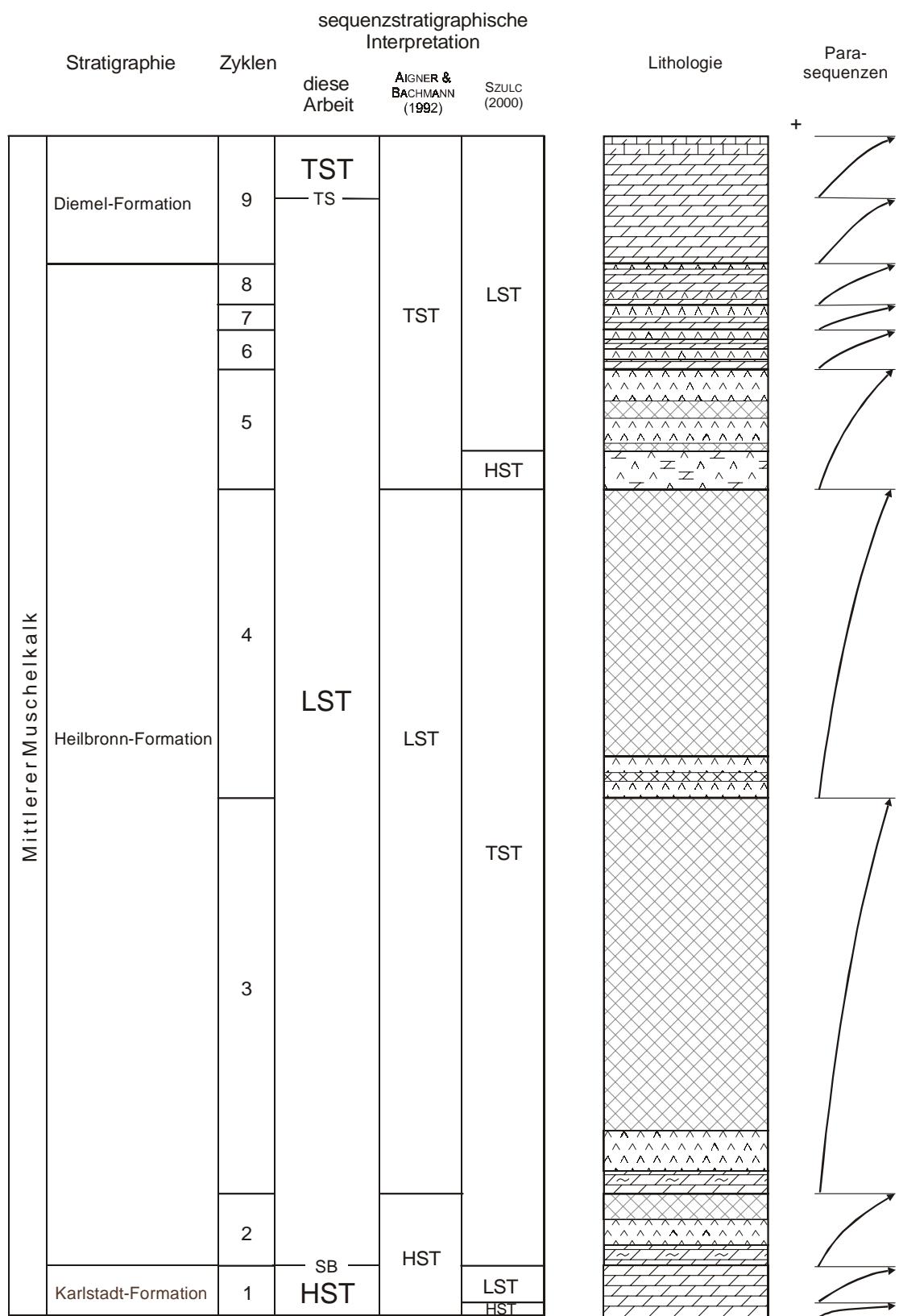


Abb. 63: Standardprofil des Mittleren Muschelkalks im Norddeutschen Becken mit sequenzstratigraphischer Interpretation

Diese Untersuchungen bestätigen und modifizieren die Untersuchungen von AIGNER & BACHMANN (1992) (Abb. 63). Im Gegensatz dazu stehen die Ergebnisse von SZULC (2000), der eine nachgeordnete Sequenz (An4) unterscheidet. Die sulfat- und steinsalzführenden Abschnitte des Mittleren Muschelkalks (Zyklen 2 – 4) werden dem Transgressiven Systemtrakt dieser 4. Anis-Sequenz (An4) zugeordnet (Abb. 63), während der Mittlere Dolomit Süddeutschlands den Hochstand-Systemtrakt repräsentiert. Die darüber folgenden Evaporite und Dolomite bilden nach SZULC den Tiefstand-Systemtrakt der 1. Ladin-Sequenz. Der Transgressive Systemtrakt beginnt mit der Trochitenkalk-Formation. Eine genaue Korrelation des Norddeutschen Beckens mit dem Polnischen Muschelkalkbecken steht jedoch noch aus.

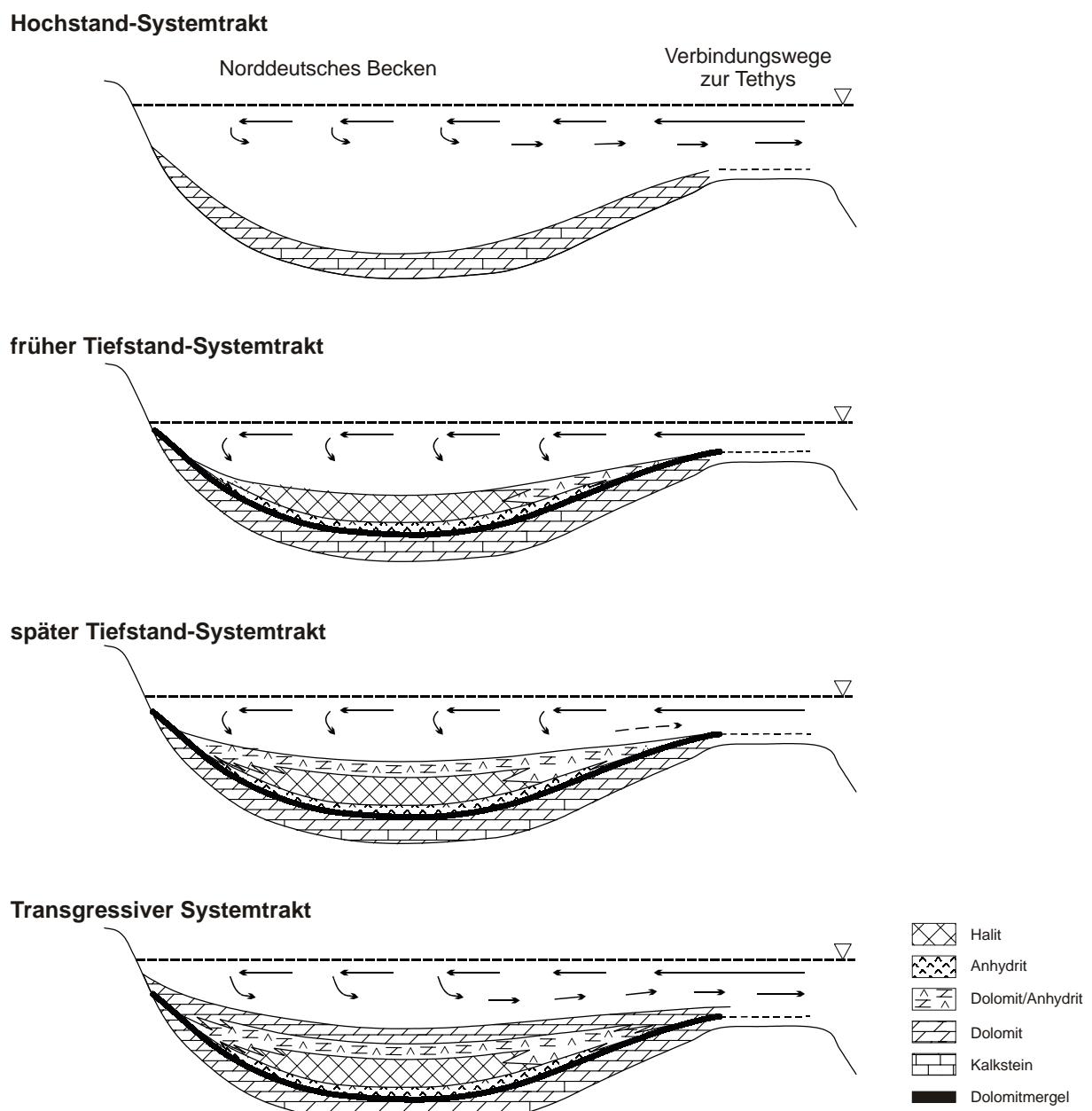


Abb. 64: Schematisches Ablagerungsmodell für den Mittleren Muschelkalk Norddeutschlands

Eine Abschätzung der Dauer der Zyklen im Mittleren Muschelkalk kann über die geschätzte Dauer des Mittleren Muschelkalks und der Anzahl der Parasequenzen erfolgen. Allgemein muss davon ausgegangen werden, dass sich hochfrequente Sequenzen und Parasequenzen über einen Zeitraum von 0,1 - 0,5 Mio. Jahre (4. Ordnung) entwickeln. MENNING (1995) gibt für den Mittleren Muschelkalk eine Zeidauer von ca. 1,5 Mio. Jahren an. Für die Parasequenzen des Mittleren Muschelkalks Norddeutschlands kann daher jeweils eine durchschnittliche Dauer von ca. 135 000 Jahren angenommen werden.

DANK

Zahlreiche Kollegen und Freunde haben an der Verwirklichung dieser Dissertation großen Anteil. Für deren tatkräftige und engagierte Unterstützung möchte ich mich an dieser Stelle recht herzlich bedanken.

Die Anregung zu der vorliegenden Arbeit wurde von Herrn Dr. F. Kockel, BGR Hannover gegeben. Für seine vielfältige Unterstützung, kritischen Diskussionen und stete Förderung, die in besonderem Maße zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben, sei ihm ganz herzlich gedankt.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. G. H. Bachmann, Universität Halle für seine engagierte und hilfreiche Betreuung der Arbeit, das stete Interesse an deren Fortgang und für vielfältige Anregungen und Diskussionen.

Mein Dank gilt weiterhin allen ehemaligen und jetzigen Kolleginnen und Kollegen der Arbeitsgruppe „Strukturgeologie“ der BGR, die mir mit Rat und Tat zur Seite standen, sei es durch Diskussionsbeiträge und Anregungen unterschiedlichster Art. Nicht zu vergessen sind die tatkräftigen Helfer bei der technischen Fertigstellung u. a. von Abbildungen und Anlagen. Danken möchte ich R. Baldschuhn, Dr. G. Best, B. Borach, S. Fleig, U. Frisch, Dr. P. Krull, M. Mitlewski, R. Siebrecht, H. Stamme und M. Szurlies.

Ebenfalls sei den Herren Profs. Stahl und Hollerbach, BGR und ihren Mitarbeitern gedankt, ohne die die geochemischen Untersuchungen nicht möglich gewesen wären. Danken möchte ich auch Dr. Thomas Wipperman für zahlreiche Diskussionen.

Die Gesellschaft für Strahlenforschung (GSF) stellte freundlicherweise die Bohrkerne der Bohrung Remlingen 7 zur Verfügung; mein besonderer Dank gilt Herrn Wallmüller für seine Unterstützung.

Frau Dr. Carmen Heunisch, NLfB Hannover, übernahm die palynologischen Bestimmung. Hierfür sowie für zahlreiche Diskussionen und die kritische Durchsicht des Manuskripts sei ihr herzlich gedankt.

Herrn Dr. K-C. Käding, ehemals Kali + Salz Kassel verdanke ich eine Befahrung und Beprobung der im Schacht Hattorf eingelagerten Bohrung Almstedt 1.

Herrn Dr. Gerhard Beutler, GLA - Sachsen-Anhalt sowie den Kollegen und Kolleginnen der Subkommission Perm-Trias danke ich für Diskussionen zur Paläogeographie und Lithostratigraphie der triassischen Schichtenfolgen.

Bei meinem Mann möchte ich mich ganz besonders für wertvolle Diskussionen, seine tatkräftige Unterstützung und die Geduld an den vielen arbeitsreichen Wochenenden bedanken.

Für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit bedanke ich mich bei der DFG (Projekt BA 487/5-1, KO 499/3-1).

LITERATURVERZEICHNIS

- AIGNER, T. (1985): Storm depositional systems. - Lecture notes in Earth Sci., 3: 1-174, 83 Abb.; Heidelberg (Springer).
- AIGNER, T. & BACHMANN, G. H. (1989): Dynamic stratigraphy of an evaporite-to-red bed sequence, Gipskeuper (Triassic), Southwest German Basin. - Sediment. Geol., 62, 1: 5-25, 16 Abb.; Amsterdam (Elsevier).
- AIGNER, T. & BACHMANN, G. H. (1992): Sequence-stratigraphic framework of the German Triassic. - Sediment. Geol., 80, 1-2: 115-135, 14 Abb.; Amsterdam (Elsevier).
- AIGNER, T. & BACHMANN, G. H. (1993): Sequence stratigraphy of the German Muschelkalk. - In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (eds.): Muschelkalk: 15 - 18, 2 Abb.; Stuttgart (Goldschnecke-Verlag).
- AIGNER, T., BACHMANN, G. H. & HAGDORN, H. (1990): Zyklische Stratigraphie und Ablagerungsbedingungen von Hauptmuschelkalk, Lettenkeuper und Gipskeuper in Nordost-Württemberg (Exkursion E am 19. April 1990). - Jber. u. Mitt. Oberrh. Geol. Ver., N. F., 72: 125-143, 10 Abb.; Stuttgart.
- AIGNER, T., HORNUNG, J., JUNGHANS, W.-D., PÖPPELREITER, M. (1999): Baselevel cycles in the Triassic of the South-German Basin: a short progress report. - Zbl. Geol. Paläont. Teil I, 1998, 7-8: 537-544, 1 Abb.; Stuttgart.
- ALSHARHAN, A. S. & KENDALL, C. G. S. C. (1994): Depositional setting of the Upper Jurassic Hith Anhydrite of the Arabian Gulf: an analog to Holocene evaporites of the United Arab Emirates and Lake MacLeod of Western Australia. - Bull. amer. Ass. Petrol. Geol, 78: 1075-1096.
- ALTHEN, G. W., RUSTBÜLT, J. & SEEGER, J. (1980): Ergebnisse einer regionalen Neubearbeitung des Muschelkalkes der DDR. - Z. geol. Wiss., 8, 8: 985-1000, 7 Abb., 1 Tab.; Berlin.
- ANDERSON, R. Y., DEAN, W. E., KIRKLAND, D. W. & SNIDER, H. I. (1972): Permian Castile varved anhydrite sequence, west Texas and New Mexico. - Geol. Soc. America Bull., 83, 1: 59-86, 18 Abb.; Boulder.
- ANDERSON, R. Y., KIETZKE, K. K. & RHODES, D. J. (1978): Development of dissolution breccias, northern Delaware Basin, New Mexico and Texas. - In: AUSTIN, G. S. (ed.): Geology and mineral Deposits of Ochoan Rocks in Delaware Basin and Adjacent Areas. - New Mexico Bur. Mines and Min. Resources Circ., 159: 47-52; Socorro, New Mexico.
- BACHMANN, G. H. (1973): Die karbonatischen Bestandteile des Oberen Muschelkalkes (Mittlere Trias) in Südwest-Deutschland und ihre Diagenese. - Arb. Inst. Geol. Paläont. Univ. Stuttgart, N.F., 68: 1 - 99, 67 Abb.; Stuttgart.
- BACHMANN, K. (1985): Mineralogische und chemische Untersuchungen an Bohrkernen des Staßfurt-Steinsalzes im Salzstock Asse. - Kali und Steinsalz, 9: 132-138, 9 Abb.; Hannover.
- BACKHAUS, E. (1969): Stratigraphie und Geomechanik des Mittleren und tiefsten Oberen Muschelkalkes in der Vorderen Rhön (Bl. 5424 Fulda). - Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., 97: 206-225, 3 Abb., 3 Tab.; Wiesbaden.
- BALDSCHUHN, R. (1985): Geotektonischer Atlas von NW-Deutschland 1:100 000, Bl. C 3522, Hannover-Nord. - Unveröff. Bericht BGR, Archiv-Nr. 97 178: 76 S., 14 Abb., 32 Anl.; Hannover.
- BALDSCHUHN, R. & KOCKEL, F. (1997): Geotektonischer Atlas von NW-Deutschland 1:100 000, Blatt C 3910, Rheine. - Unveröff. Bericht BGR, Archiv-Nr. 112 933: 74 S., 26 Anl.; Hannover.

- BALDSCHUHN, R., FRISCH, U. & KOCKEL, F. (1999): Die Strukturen im Untergrund NW-Deutschlands 1:500 000. - 1 Kt.; Hannover.
- BALDSCHUHN, R., FRISCH, U. & KOCKEL, F. (1996): Geotektonischer Atlas von NW-Deutschland 1:300 000, Teil 1-17. - 71 Anl.; Hannover (BGR).
- BALZER, D. (1997): Mikrofazies-Analyse von Ca-Sulfatgesteinen des Zechstein. - Geol. Jb., D 106: 3-99, 3 Abb., 3 Tab., 23 Taf.; Hannover.
- BAUSCH, W. M. (1968): Outlines on the distribution of strontium in marine limestones. - In: MÜLLER, G. & FRIEDMAN, G. M. (eds.): Recent developments in carbonate sedimentology in Central Europe: 106-115, 6 Abb., 1 Tab.; Heidelberg (Springer).
- BAUTSCH, H.-J. & DAMASCHUN, F. (1995): Über den Coelestin von Rüdersdorf. - Berliner geowiss. Abh., A 168: 259-270, 3 Abb., 2 Taf.; Berlin.
- BEHRENS, E. W. & LAND, L. S. (1972): Subtidal Holocene dolomite, Baffin Bay, Texas. - J. Sediment. Petrol., 42: 155-161, 5 Abb., 2 Tab.; Tulsa.
- BEIERSDORF, H. (1968): Spuren syn- und postdiagenetischer tektonischer Beanspruchung in Karbonatgesteinen Mittel- und Südsaxoniens (Horizontalstyolithen, Längsrippung und Längsplattung in Karbonatgesteinen Mittel- und Südsaxoniens). - Diss. Univ. Göttingen, 84 S., 38 Abb.; Göttingen.
- BEIN, A. & LAND, L. S. (1983): Carbonate sedimentation and diagenesis associated with Mg-Ca chloride brines: The Permian San Andros Formation in the Texas Panhandle. - J. Sediment. Petrol., 53: 243-260, 11 Abb., 2 Tab.; Tulsa.
- BEST, G. (1988): Die Grenze Zechstein/Buntsandstein in Nordwestdeutschland und in der südlichen Nordsee nach Bohrlochmessungen (Gamma-Ray und Sonic-Log). - Geol. Jb. Hessen, 116: 19-22, 1 Abb.; Wiesbaden.
- BEST, G. (1989): Die Grenze Zechstein/Buntsandstein in Nordwestdeutschland nach Bohrlochmessungen. - Z. dt. geol. Ges., 140: 73-85, 5 Abb., 1 Taf.; Hannover.
- BEST, G. (1986): Die Grenze Buntsandstein/Zechstein nach Bohrlochmessungen (Gamma Ray und Sonic Log) im Nordwestdeutschen Becken. - Unveröff. Bericht BGR, Archiv-Nr. 98 933: 17 S., 58 Anl.; Hannover.
- BEST, G., RÖHLING, H.-G. & BRÜCKNER-RÖHLING, S. (1993): Synsedimentäre Tektonik und Salzkissenbildung während der Mittleren Trias in Norddeutschland. - In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (eds.): Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991: S. 37; Stuttgart (Goldschnecke).
- BESTEL, G. (1929): Das Steinsalz im Germanischen Muschelkalk. - Jb. preuß. geol. Landesanst., 50: 263-321, 3 Abb.; Berlin.
- BEUTLER, G. (1993): Der Muschelkalk zwischen Rügen und Grabfeld. - In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (eds.): Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991: 47-56, 12 Abb.; Stuttgart (Goldschnecke).
- BEUTLER, G. (1995a): Der Einfluß der Mitteldeutschen Hauptbrüche auf die Mächtigkeitsentwicklung der Trias. - Berliner geowiss. Abh., A 168: 31-42, 10 Abb., 1 Tab.; Berlin.
- BEUTLER, G. (1995b): Quantifizierung der altkimmerischen Bewegungen in Nordwestdeutschland, Teil I: Stratigraphie des Keupers, Bd. 1 und 2. - Unveröff. Bericht BGR, Archiv-Nr. 113 087: 1-147, 35 Abb., 13 Tab., 5 Anl.; Hannover.
- BEUTLER, G., GAERTNER, H. & RÖHLING, H.-G. (1992): Zur Muschelkalk/Keuper-Grenze im Norddeutschen Becken. - Nachr. dt. Geol. Ges., 48: 54-55; Hannover.

- BINOT, F. & RÖHLING, H.-G. (1988): Lithostratigraphie und natürliche Gammastrahlung des Mittleren Buntsandsteins von Helgoland. - Z. deutsch. geol. Ges., 139: 33-49, 6 Abb., 1 Taf.; Hannover.
- BOIGK, H. (1961a): Ergebnisse und Probleme stratigraphisch-paläogeographischer Untersuchungen im Buntsandstein Nordwestdeutschlands. - Geol. Jb., 78: 123-134, 7 Abb.; Hannover.
- BOIGK, H. (1961b): Zur Fazies und Erdgasführung des Buntsandsteins in Nordwestdeutschland. - Erdöl, Kohle, Erdgas, Petrochem., 14, 998-1005, 9 Abb.; Hamburg.
- BORNEMANN, O. (1979): Das Gefügeinventar nordwestdeutscher Salzstrukturen in Abhängigkeit von ihrer halokinetischen Stellung. - Diss. Univ. Braunschweig: 119 S., 31 Abb., 5 Tab., 9 Taf.; Braunschweig.
- BOSELLINI, A. & HARDIE, A. (1973): Depositional theme of a marginal marine evaporite. - Sedimentology, 20: 5-27, 15 Abb.; London.
- BRADEL, E. (1985): Bohrlochgeophysik. - In: BENDER, F. (ed.): Angewandte Geowissenschaften, Band II: 610 - 666, 57 Abb., 2 Tab.; Stuttgart.
- BRAITSCH, O. (1962): Entstehung und Stoffbestand der Salzlagerstätten. - Mineralogie und Petrographie in Einzeldarstellungen, 3: 1-297; Berlin u. a. (Springer).
- BRAITSCH, O. (1971): Salt Deposits. Their Origin and Composition. - 297 S.; Berlin (Springer).
- BRANDNER, R. (1984): Meeresspiegelschwankungen und Tektonik in der Trias der NW-Tethys. - Jb. Geol. B. A., 126, 4: 435-475, 25 Abb.; Wien.
- BROWN, L. F. & FISHER, W. L. (1977): Seismic-stratigraphic interpretation of depositional systems: examples from Brazil rift and pull-apart basins. - In: PAYTON, C. E. (ed.): Seismic Stratigraphy - Applications to Hydrocarbon Exploration: AAPG Mem., 26: 213-248, 21 Abb.; Tulsa.
- BRÜCKNER-RÖHLING, S. (1999): Sequenzstratigraphie des Mittleren Muschelkalks in Norddeutschland und der Deutschen Nordsee. - Unveröff. Bericht, DFG-Abschlußbericht, BGR-Archiv 117 876, 15 S., 11 Abb., 2 Tab., 6 Anl.; Hannover.
- BRÜCKNER-RÖHLING, S. (2000): Chemocyclicity in the Middle Muschelkalk of Northern Germany. - Zbl. Geol. Paläont., Teil 1, 1998 9-10: 941-951, 6 Abb.; Stuttgart.
- BRÜCKNER-RÖHLING, S. & KOCKEL, F. (1999): Muschelkalk. - In: KOCKEL, F.: Geotektonischer Atlas von NW-Deutschland 1:300 000, Teil 18: Die paläogeographische und strukturelle Entwicklung Nordwestdeutschlands, Bd. 3: Der Zechstein, die Trias. - Unveröff. Bericht BGR, Archiv 115 557: 82-94, 12 Abb., 2 Tab.; Hannover.
- BRÜCKNER-RÖHLING, S. & LANGBEIN, R. (1993): Logstratigraphie des Mittleren Muschelkalks in der Bohrung Hakeborn-211 (Subherzynes Becken) und Logkorrelation zwischen Thüringer Becken, Subherzyn und Norddeutschem Becken. - In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (eds.): Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991: 105-110, 6 Abb.; Stuttgart (Goldschnecke).
- BÜHL, A. & ZÖFEL, P. (1995): SPSS für Windows, Version 6.1: Praxisorientierte Einführung in die moderne Datenanalyse. - 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, 624 S.; Bonn, Paris u. a..
- BUSSE, E. (1970): Ceratiten und Ceratiten-Stratigraphie. - Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., 98: 112-145, 2 Tab.; Wiesbaden.
- BUSSE, E. & HORN, M. (1982): Muschelkalk. - In: Erl. geol. Kt. Hessen 1:25 00, Bl. 4520 Warburg: 55-90, 6 Abb., 6 Tab.; Wiesbaden.
- BUSSON, G. & SCHREIBER, B. C. (1997): Sedimentary Deposition in Rift and Foreland Basins in France and Spain (Paleogene and Lower Neogene). - 479 S.; New York (Columbia University Press).

- CALVET, F., TUCKER, M. E. & HENTON, J. M. (1990): Middle Triassic carbonate ramp systems in the Catalan Basin, northeast Spain: facies, systems tracts, sequences and controls. - Spec. Publ. Ass. Sediment., 9: 79-108, 25 Abb., 1 Tab.; Oxford.
- CAROZZI, A. V. (1993): Sedimentary Petrography. - 163 S., 76 Abb., 32 Taf.; Englewood Cliffs (Prentice Hall).
- CORRENS, C. W. (1971/1972): Zur Geochemie des Titans. - Vesnik (geologija), 29/30: 319-339, 7 Abb., 3 Tab., Beograd.
- COUREL, L., BOURQUIN, S., JAQUIN, T. & VANNIER, F. (1992): Sequence Stratigraphy of the Triassic series on the western Peri-Tethyan margin (France, Switzerland). - Abstracts of Intern. Symp. Mesozoic and Cenozoic sequence stratigraphy of European basins: 120-121; Dijon.
- CROSS, T., LESSENGER, M. A. (1998): Sediment volume partitioning: rationale for stratigraphic model evaluation and high-resolution stratigraphic correlation. - Norwegian Petroleum Society, Spec. Publ., 8: 171-195, 16 Abb., 1 Tab.; Amsterdam (Elsevier).
- DEAN, W. E. & ANDERSON, R. Y. (1982): Continuous subaqueous deposition of the Permian Castile evaporites, Delaware Basin, Texas and New Mexico. - In: HANDFORD, C. R., LOUKS, R. G. & DAVIES, G. R. (eds.): Depositional and Diagenetic Spectra of Evaporites - A Core Workshop. - SEPM Core Workshop 3: 324-353, 19 Abb.; Calgary.
- DE BOORDER, H., LUTGERT, J. E. & NIGMAN, W. (1985): The Muschelkalk and its lead-zinc mineralization in the eastern Netherlands. - Geol. en Mijnb., 64, 3: 311-326, 7 Abb., 1 Tab.; Amsterdam.
- DE JONGH, W. K. (1976): X-Ray Fluorescence Analysis Applying Theoretical Matrix Corrections Stainless Steel. - Norelco Reporter, 23, 2: 26-32; Mount Vernon, N.Y..
- DE ZANCHE, V., GIANOLLA, P., SIORPAES, C. & VAIL, P. R. (1993): Triassic Sequence Stratification in the Dolomites (Italy). - Mem. Sci. geol., 45: 1-27, 26 Abb., 2 Taf.; Padova.
- DELLWIG, L. F. (1966): The Muschelkalk Salt at Heilbronn, Germany. - In: RAU, J. L. (ed.): Second Symposium on Salt, Northern Ohio Geol. Soc., I: 328-334, 7 Abb.; Cleveland Ohio.
- DRONKERT, H. (1987): Diagenesis of Triassic evaporites in northern Switzerland. - Eclogae geol. helv., 80, 2: 397-413, 3 Abb., 3 Taf.; Basel.
- DRONKERT, H., BLÄSI, H.- R. & MATTER, A. (1990): Facies and Origin of Triassic Evaporites from the Nagra Boreholes, Northern Switzerland. - Geol. Ber. Landeshydrol. u. -geol., 12: 120 S., 15 Taf., 20 Beil.; Bern.
- DUCHROW, H. & GOETZNER, J.-P. (1984): Oberer Muschelkalk. - In: KLASSEN, H. (ed.): Geologie des Osnabrücker Berglandes: 169-219, 5 Abb., 3 Anl.; Osnabrück.
- DULCE, G., HARMS, F., KATSCHOREK, T. & KOCKEL, F. (1993): Paläogeographie und synsedimentäre Tektonik im Oberjura des Niedersachsenbeckens, Abschlußbericht DFG-Projekt Ko 499/2-1. - Unveröff. Bericht BGR, Archiv-Nr. 110812: 1-112 , 47 Anl.; Hannover.
- DUNHAM, R. J. (1962): Classification of carbonate rocks according to depositional texture. - In: HAM, W. E.: Classification of carbonate rocks - a symposium. - Am. Ass. Petrol. Geologists, Mem 1: 108-121, 1 Tab., 7 Taf.; Tulsa.
- DÜNKEL, H. (1992): Stratigraphie, Petrographie und Fazies des Mittleren Muschelkalks in Südniedersachsen im Vergleich mit den angrenzenden Gebieten. - Diss. Univ. Göttingen, 147 S., 22 Abb., 11 Tab., 13 Taf.; Göttingen.
- DÜNKEL, H. & VATH, U. (1990): Ein vollständiges Profil des Muschelkalks (Mitteltrias) der Dransfelder Hochfläche, SW Göttingen (Südniedersachsen). - Geol. Jb. Hessen, 188: 87-126, 6 Abb., 3 Tab., 3 Taf.; Wiesbaden.

- DUVAL, B., CRAMEZ, C. & VAIL, P. R. (1992): Types and hierarchy of stratigraphic cycles. - Abstracts of Intern. Symp. Mesozoic and Cenozoic sequence stratigraphy of European basins: 44-45; Dijon.
- EINSELE, G. & SCHÖNENBERG, R. (1964): Epirogen-tektonische Grundzüge des süddeutschen Beckens und seiner Randgebiete im Mesozoikum. – In: Livre a la memoire du Doteur Michel Lucius: 139 – 164; Luxembourg.
- EINSELE, G. (1991): Cycles and Events in Stratigraphy. – 995 S.; Berlin.
- ENGELHARDT, W. v. (1936): Die Geochemie des Bariums. - Chemie d. Erde, 10: 197-246, 4 Abb.; Jena.
- ERNST, W. (1993): Der Muschelkalk im westlichen Thüringen. - In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (eds): Muschelkalk, Schöntaler Symposium 1991: 73-78, 6 Abb., 3 Tab.; Stuttgart (Goldschneck).
- FARRENSCHON, J. (1986): Erläuterungen zu Blatt 4019 Detmold. - Geol. Kt. Nordrh.-Westf. 1:25 000, Erl., 4019, 2. Aufl.: 172 S., 13 Abb., 15 Tab., 3 Taf.; Krefeld.
- FARRENSCHON, J. (1990): Erläuterungen zu Blatt 4119 Horn-Bad Meinberg. - Geol. Kt. Nordrh.-Westf. 1:25 000, Erl., 4119, 2. Aufl.: 195 S., 13 Abb., 13 Tab., 1 Taf.; Krefeld.
- FIEGE, K. (1938): Die Epirogenese des Unteren Muschelkalks in Nordwestdeutschland. - Zentr. Min. Geol. Paläont., 1938 B: 143-170; Stuttgart.
- FISHER, W. L. & MCGOWAN, J. H. (1967): Depositional systems in the Wilcox Group of Texas and their relationship to occurrence of oil and gas. - Gulf coast Association of geological Societies, Transactions, 17: 105-125, 10 Abb.; San Antonio/Texas.
- FLÜGEL, E. (1982): Microfacies analysis of limestones. - 647. S.; Berlin, Heidelberg, New York (Springer).
- FOLK, R. L. (1959): Practical petrographic classification of limestones. - Bull. Am. Ass. Petrol. Geologists, 43: 1-38, 41 Abb., 2 Tab.; Tulsa.
- FREUDENBERGER, W. (1996): Trias. - In: Bayrisches Geologisches Landesamt (Hrsg.): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000. - 4. Aufl.: 55-64, 4 Abb., 3 Tab.; München.
- FRIEDEL, C.-H. (1995): Stylolithen im Rüdersdorfer Schaumkalk - Wechselwirkung zwischen sedimentären Gefüge und Spannung. - Berliner geowiss. Abh., A 168: 219-235, 3 Abb., 2 Taf.; Berlin.
- FRIEDEL, G. (1988): Die lithofaziellen Einheiten des Mittleren Muschelkalks (mm) am Unteren Necker - Stratigraphie und Genese. - Diss. Univ. Heidelberg, 121 S., 23 Abb., 6 Tab., 8 Taf.; Heidelberg.
- FRIEDEL, G. & SCHWEIZER, V. (1989): Zur Stratigraphie der Sulfatfazies im Mittleren Muschelkalk von Baden-Württemberg (Süddeutschland). - Jh. geol L.-amt Baden-Württ., 31: 69-88, 7 Abb.; Freiburg.
- FRIEDEL, G. & SCHWEIZER, V. (1991): Anhydrit und Gips - ihre Verteilung im Mittleren Muschelkalk nördlich von Heilbronn. - Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N. F., 73: 187-203, 5 Abb., 1 Tab., 1 Taf.; Stuttgart.
- FRISCH, U. (1985): Geotektonischer Atlas von NW-Deutschland 1:100 000, Bl. C 3510, Quakenbrück. - Unveröff. Bericht BGR, Archiv-Nr. 98 768: 62 S., 17 Abb., 4 Tab., 34 Anl.; Hannover.
- FRISCH, U. (1989): Geotektonischer Atlas von NW-Deutschland 1:100 000, Bl. C 2706, Emden. - Unveröff. Bericht BGR, Archiv-Nr. 103 550: 108 S., 15 Abb., 2 Tab., 29 Anl.; Hannover.
- FRISCH, U. & KOCKEL, F. (1997): Altkimmerische Bewegungen in Nordwestdeutschland. - Brandenburgische Geowiss. Beitr., 4: 19 - 29, 10 Abb.; Potsdam.

- FRISCH, U. & KOCKEL, F. (1998): Quantifizierung der altkimmerischen Bewegungen in Nordwestdeutschland, Teil 2. - Unveröff. Bericht BGR, Archiv-Nr. 115 250, 1 Tab., 35 Anl.; Hannover.
- FRISCH, U. & KOCKEL, F. (1999): Quantification of early Cimmerian movements in NW-Germany. - Zbl. Geol. Paläont. Teil I, Heft 7-8: 571 - 600, 11 Abb., 1 Tab.; Stuttgart.
- FRITZ, P. & KATZ, A. (1972): The sodium distribution of dolomite crystals. - Chem. Geol., 10: 237-244, 5 Abb., 1 Tab.; Amsterdam.
- FÜCHTBAUER, H. (1959): Zur Nomenklatur der Sedimentgesteine. - Erdöl u. Kohle, 12: 605 - 613, 7 Abb., 2 Taf.; Hamburg.
- FÜCHTBAUER, H. (ed.) (1988): Sedimente und Sedimentgesteine. - 1141 S., 660 Abb., 113 Tab.; Stuttgart.
- GAERTNER, H. (1993): Zur Gliederung des Muschelkalks in Nordwestdeutschland in Tiefbohrungen anhand von Bohrlochmessungen. - In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (eds.): Muschelkalk. - Schöntaler Symposium 1991: 57-64, 5 Abb., 2 Tab.; Stuttgart (Goldschneck).
- GAERTNER, H. & RÖHLING, H.-G. (1993): Zur lithostratigraphischen Gliederung und Paläogeographie des Mittleren Muschelkalks im Nordwestdeutschen Becken. - In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (eds.): Muschelkalk. - Schöntaler Symposium 1991: 85-103, 15 Abb.; Stuttgart (Goldschneck).
- GAST, R. (1988): Rifting im Rotliegenden Niedersachsens. - Die Geowissenschaften, 6, 4: 115-122, 14 Abb.; Weinheim.
- GEISLER, R. (1939): Zur Stratigraphie des Hauptmuschelkalks in der Umgebung von Würzburg mit besonderer Berücksichtigung der Ceratiten. - Jb. preuß. geol. L.-Anst., 59: 197-248, 16 Abb., 5 Taf.; Berlin.
- GEISLER-CUSSEY, D. (1987): Middle Muschelkalk Evaporitic Deposits in Eastern Paris Basin. - In: PERYT, T. M. (ed.): Evaporite Basins. - Lecture Notes in Earth Sciences, 13: 89-121, 25 Abb.; Heidelberg (Springer).
- GELUK, M. (1995): Stratigraphische Gliederung der z2-(Staßfurt-)Salzfolge in den Niederlanden: Beschreibung und Anwendung bei der Interpretation von halokinetisch gestörten Sequenzen. - Z. dt. geol. Ges., 146: 458-465, 6 Abb., 1 Tab.; Hannover.
- GELUK, M. (1999): Late Permian (Zechstein) rifting in the Netherlands: models and implications for petroleum geology. - Petroleum Geoscience, 5: 189-199, 14 Abb.; London.
- GELUK, M. C. & RÖHLING, H.-G. (1997): High resolution sequence stratigraphy of the Lower Triassic „Buntsandstein“ in the Netherlands and northwestern Germany. - Geol. en Mijnb., 76: 227-246, 12 Abb., 3 Tab.; s'Gravenhage (Kluwer Academic Publ.).
- GELUK, M., BRÜCKNER-RÖHLING, S. & RÖHLING, H.-G. (2000): Salt occurrence in the Netherlands and Germany: new insights in the formation of salt basins. - In: GEERTMAN, M. (ed.): 8th World Salt Symposium, Vol. 1: 125-130, 3 Abb.; Amsterdam.
- GENSER, C. (1930): Zur Stratigraphie und Chemie des Mittleren Muschelkalks in Franken. - Geol. Paläont. Abh., N. F., 17, 4: 111 S., 4 Abb., 8 Taf.; Jena (Fischer).
- GOLDSMITH, J. R. & GRAF, D. L. (1958): Structural and compositional variations in some natural dolomites. - J. Geol., 66: 678 - 693, 4 Tab., 2 Taf.; Chicago.
- GOLDSMITH, J. R., GRAF, D. L. & HEARD, H. C. (1961): Lattice constants of the calcium-magnesium carbonates. - Amer. Miner., 46: 453-457, 2 Abb., 3 Tab.; Washington.

- GÖTZ, A. & FEIST-BURKHARDT, S. (2000): Palynofacies and sequence analysis of the Lower Muschelkalk (Middle Triassic, German Basin). - Zbl. Geol. Paläont., Teil 1, 1998, 9-10: 877-891, 5 Abb., 1 Taf.; Stuttgart.
- GRALLA, P. (1988): Das Oberrotliegende in NW-Deutschland - Lithostratigraphie und Faziesanalyse. - Geol. Jb., A 106: 3-59, 34 Abb., 3 Taf.; Hannover.
- GRAMANN, F., HEUNISCH, C., KLASSEN, H., KOCKEL, F., DULCE, G., HARMS, F.-J., KATSCHOREK, T., MÖNNING, E., SCHUDACK, M., SCHUDACK, U., THIES, D., WEISS, M. & HINZE, C. (1997): Das Niedersächsische Oberjurabecken - Ergebnis interdisziplinärer Zusammenarbeit. - Z. dt. geol. Ges., 148/2: 165-236, 18 Abb., 1 Tab., 1 Taf.; Stuttgart.
- GRIMM, R. E. (1951): The depositional environment of red and green shales. - J. Sediment. Petrol., 21, 4: 226-232; Tulsa.
- GROETZNER, J.-P. (1962): Stratigraphisch-fazielle Untersuchungen des Oberen Muschelkalks im südlichen Niedersachsen zwischen Weser und Oker. - Unveröff. Diss. TU Braunschweig: 1-124, 9 Taf.; Braunschweig.
- GROETZNER, J.-P. (1984): Unterer und Mittlerer Muschelkalk. - In: KLASSEN, H. (ed.): Geologie des Osnabrücker Berglandes: 153-168, 5 Abb., 1 Anl.; Osnabrück.
- GROTZINGER, J. P. (1986): Cyclicity and paleoenvironmental dynamics, Rocknest platform, northwest Canada. - Geol. Soc. Am. Bull., 97: 1208-1231, 24 Abb.; Boulder.
- GWINNER, M. P. (1970): Revision der lithostratigraphischen Nomenklatur im Oberen Hauptmuschelkalk des nördlichen Baden-Württemberg. - N. Jb. Geol. Paläont., Mh. 2: 77-87, 4 Abb., 1 Tab.; Stuttgart.
- HAACK, W. (1926): Zur Kenntnis der Osnabrücker Trias. - Jb. preuss. geol. L. A., 47: 160-207, 2 Abb.; Berlin.
- HABICHT, J. K. A. (1979): Paleoclimate, Paleomagnetism and continental drift. - AAPG studies in Geol., 9: 31 S., 19 Abb., 11 Anl.; Tulsa.
- HAGDORN, H., HICKETHIER, H., HORN, M. & SIMON, T. (1987): Profile durch den hessischen, unterfränkischen und baden-württembergischen Muschelkalk. - Geol. Jb. Hessen, 115: 131 - 160, 3 Taf., 2 Abb., 2 Tab.; Wiesbaden.
- HAGDORN, H., HORN, M. & SIMON, T. (1993): Vorschläge für eine lithostratigraphische Gliederung und Nomenklatur des Muschelkalks in Deutschland. - In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (eds.): Muschelkalk. - Schöntaler Symposium 1991: 39-46, 1 Tab.; Stuttgart (Goldschnecke).
- HAGDORN, H., HORN, M. & SIMON, T. (1998): Muschelkalk. - Hall. Jb. Geowiss., B, Bh. 6: 35-44, 5 Abb.; Halle.
- HAGDORN , H. & SIMON, T. (in Vorb.): Muschelkalk-Monographie
- HANDFORD, C. R. & LOUCKS, R. G. (1993): Carbonate depositional sequences and systems trakts - responses of carbonate platforms to relativ sea-level changes. - In: LOUCKS, G. R. & SARG, J. F. (eds.): Carbonate sequence stratigraphy. - Mem. Amer. Assoc. Petrol. Geol., 37: 3-41, 16 Abb., 2 Tab.; Tulsa.
- HAQ, B. U., HARDENBOHL, J. & VAIL, P. R. (1987): Chronology and fluctuating sea levels since the Triassic (250 million years ago to present). - Science, 235: 1156-1167, 5 Abb.; Washington.
- HARDIE, L. A. (1987): Dolomitization: a critical view of some current views. - J. Sediment. Petrol., 57, 1: 166-183, 8 Abb.; Tulsa.

- HAUBER, L. (1980): Geology of the salt-field Rheinfelden-Riburg, Switzerland. - In: COOGAN, A. H. & HAUBER, L. (eds.): Proceedings fifth symposium on Salt., 1: 83-90, 7 Abb., 1 Taf.; Cleveland (Northern Ohio Geol. Soc.).
- HAUBER, L. (1993): Der Mittlere Muschelkalk am Hochrhein. - N. Jb. Geol. Paläont., Abh., 189, 1-3: 147-170, 9 Abb., 2 Tab.; Stuttgart.
- HEUNISCH, C. (1990): Palynologie der Bohrung "Natzungen 1979", Blatt 4321 Borgholz (Trias; Oberer Muschelkalk 2, 3, Unterer Keuper). - N. Jb. Geol. Paläont., Mh. 1990, 1: 17-42, 4 Abb., 1 Tab.; Stuttgart.
- HEUNISCH, C. (1996): Palynologie des Oberen Muschelkalk bis Unteren Lias. - In: BEUTLER, G. HEUNISCH, C., LUPOOLD, F. W., RETTIG, B. & RÖHLING, H.-G.: Muschelkalk, Keuper und Lias am Mittellandkanal bei Sehnde (Niedersachsen) und die regionale Stellung des Keupers. - Geol. Jb., A 145: 138-155, 4 Abb., 4 Tab., 4 Fototaf.; Hannover.
- HEUNISCH, C. (1997): Palynologischer Untersuchungsbericht. - Unveröff. Ber. NLfB, 13 S., 4 Abb., 3 Tab.; Hannover.
- HEUNISCH, C. (1998): Palynologischer Untersuchungsbericht. - Unveröff. Ber. NLfB, 6 S., 3 Tab.; Hannover.
- HEUNISCH, C. (1999): Die Bedeutung der Palynologie für Biostratigraphie und Fazies in der Germanischen Trias. - In: HAUSCHKE, N. & WILDE, V. (eds.) Trias, eine ganz andere Welt: Mitteleuropa im frühen Erdmittelalter: 207 - 220, 2 Abb., 1 Tab., 4 Taf.; München (Dr. Friedrich Pfeil).
- HEUNISCH, C. (in Vorb.): Palynomorphen. - Stratigraphie von Deutschland, Muschelkalk-Monographie. - Courier Forschungsinstitut Senckenberg.
- HIRSCH, F. (1992): Circummediterranean Triassic eustatic cycles. - Isr. J. Earth Sci., 40: 29-38, 2 Abb., 2 Tab.; Jerusalem.
- HITE, R. J. (1970): Shelf carbonate sedimentation controlled by salinity in the Paradox Basin, Colorado and Utah. - In: RAU J. L. & DELWIG, L. F. (eds.): Third symposium on Salt, 1: 48-66; Cleveland (Northern Ohio Geol. Soc.).
- HOFFMANN, P. (1976): Environmental diversity of middle Precambrian stromatolites. - In: WALTER, M. R. (ed.): Stromatolites. - Dev. in Sediment., 20: 599-611, 11 Abb.; Amsterdam (Elsevier).
- HOFFMANN, U. (1967a): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25000, Blatt Nr. 6125 Würzburg Nord. - 94 S., 21 Abb., 1 Tab., 4 Beil.; München.
- HOFFMANN, U. (1967b): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25000, Blatt Nr. 6225 Würzburg Süd. - 134 S., 17 Abb., 2 Tab., 4 Beil.; München.
- HOLSER, W. T. (1979): Trace elements and isotopes in evaporites. - Miner. Soc. Amer., short course notes, 6: 295-346, 19 Abb., 4 Tab.; Washington.
- HOLSER, W. T. (1966): Bromide geochemistry of rock salt. - In: RAU, J. L. (ed.): Second Symposium on Salt, Northern Ohio Geol. Soc., I: 248-275, 20 Abb., 2 Tab.; Cleveland Ohio.
- HOPPE, W. (1966): Die regionalgeologische Stellung der Thüringer Trias. - Ber. dt. Ges. geol. Wiss., A, Geol. Paläont., 11, 1/2: 7-38, 6 Abb., 9 Tab.; Berlin.
- HOVARKA, S. (1987): Depositional environments of marine dominated bedded halite, Permian San Andros Formation, Texas. - Sedimentology, 34: 1029-1054, 17 Abb., 1 Tab.; Oxford.
- HOVARKA, S. (1992): Halite pseudomorphs after gypsum in bedded anhydrite - clue to gypsum - anhydrite relationships. - J. Sediment. Petrol., 62: 1098-1111, 8 Abb.; Tulsa.

- JANKOWSKI, W. J. (1983): Das Abbild der Gesteine in Bohrlochmessungen und Seismik: Unterschiede und Verknüpfungen. - 3. Mintrop-Seminar 1983 - Bohrlochmessungen und seismische Interpretation: 9-32, 6 Abb.; Celle.
- JOACHIMSKI, M. M. (1991): Stabile Isotope (C, O) und Geochemie der Purbeck-Mikrite in Abhängigkeit von Fazies und Diagenese (Berriasian/Schweizer und Fränzosischer Jura, Südengland). - Erlanger geol. Abh., 119: 1-114, 61 Abb., 8 Tab., 6 Taf.; Erlangen.
- KATZUNG, G. (1975): Tektonik, Klima und Sedimentation in der Mitteleuropäischen Senke und in angrenzenden Gebieten. - Z. geol. Wiss., 3, 11: 1453-1472, 3 Abb.; Berlin.
- KEDZIERSKI, J. (1999): Sequenzstratigraphie des Muschelkalks im östlichen Teil des Germanischen Beckens (Deutschland, Polen). - Diss. Univ. Halle: 114 S., 22 Abb., 3 Tab., 5 Taf., 8 Anl.; Halle/Saale.
- KENDALL, A. C. (1992): Evaporites. - In: WALKER, R. G. & JAMES, N. P. (eds.): Facies models: response to sea level change. - 409 S.; Ontario.
- KINSMAN, D. J. (1964): Dolomitization and evaporite development, including anhydrite, in lagoonal sediments, Persian Gulf. - Spec. Pap. geol. Soc. Amer., 82: 108 - 109; New York.
- KINSMAN, D. J. (1969): Interpretation of Sr concentrations in carbonate minerals and rocks. - J. Sediment. Petrol., 39 (2): 486-508, 4 Abb., 9 Taf.; Tulsa.
- KLARR, K., KOLDITZ, H., KULL, H., SCHMIDT, M. W., SCHWEINSBERG, A., STEINBERG, S., STARKE, C. & WALLMÜLLER, R. (1990): Erstellung von Tiefbohrungen auf der Südwestflanke der Asse. - GSF-Bericht 36/90: 121 S., 26 Abb., 19 Tab.; Braunschweig.
- KLEINSORGE, H. (1935): Paläogeographische Untersuchungen über den Oberen Muschelkalk in Nord- und Mitteldeutschland. - Mitt. geol. Staatsinst. Hamburg, 15: 57 - 107, 12 Abb., 1 Taf.; Hamburg.
- KLOTZ, W. E. (1992): Zyklizität, Fazies und Genese des Unteren Muschelkalks in Südsthessen und Mainfranken. - Diss. Univ. Darmstadt, 410 S., 50 Abb., Abb. im Anhang; Darmstadt.
- KNAUST, D. (1998): Trace fossils and ichnofabrics on the Lower Muschelkalk carbonate ramp (Triassic) of Germany: tool for high-resolution sequence stratigraphy. - Geol. Rdsch., 87: 21-31, 9 Abb.; Berlin, Heidelberg (Springer).
- KOCH, G. (1984): Entwicklung und Anwendung einer radiometrischen Messmethode (Heger-Sonde) zur Kennzeichnung klastischer Gesteinsfolgen in Aufschlüssen. – Diss. Univ. Karlsruhe, 304 S., 75 Abb., 19 Taf.; Karlsruhe.
- KOCKEL, F. (1983): Geotektonischer Atlas von NW-Deutschland 1:100 000, Bl. C 3926, Braunschweig. - Unveröff. Bericht BGR, Archiv-Nr. 97216: 75 S., 35 Abb., 35 Anl.; Hannover.
- KOCKEL, F. (1991): Die Strukturen im Untergrund des Braunschweiger Landes. - Geol. Jb., A 127: 391-404, 2 Abb., 2 Taf.; Hannover.
- KOCKEL, F. (1999): Geotektonischer Atlas von NW-Deutschland 1:300 000, Teil 18: Die paläogeographische und strukturelle Entwicklung Nordwestdeutschlands, Bd. 3: Der Zechstein, die Trias. - Unveröff. Bericht BGR, Archiv 115 557: 82-94, 12 Abb., 2 Tab.; Hannover.
- KOCKEL, F. & RÖHLING, H.-G. (1999): Buntsandstein. - In: KOCKEL, F.: Geotektonischer Atlas von NW-Deutschland 1:300 000, Teil 18: Die paläogeographische und strukturelle Entwicklung Nordwestdeutschlands, Bd. 3: Der Zechstein, die Trias. - Unveröff. Bericht BGR, Archiv 115 557: 55-82, 13 Abb., 3 Tab.; Hannover.
- KOCKEL, F. WITH CONTRIBUTIONS BY: BALDSCHUHN, R., GROSS, U., JÜRGENS, U., RÖHLING, H.-G. & SATTLER-KOSINOWSKI, S. (1995): Structural and palaeogeographical development of the German North Sea sector. - Beitr. Reg. Geol., 26: 1-96, 7 Abb., 16 Anl.; Berlin-Stuttgart (Bornträger).

- KÖHLER, M. (1992): Dokumentation zum Programm XY-Plot. - Unveröff. Bericht NLfB, Archiv-Nr. 110 393: 113 S., 5 Anl.; Hannover.
- KOLB, U. (1975): Zur Mikrofazies im Unteren Muschelkalk des Subherzyns. - Z. geol. Wiss., 3, 11: 1427-1438, 14 Abb.; Berlin.
- KOZUR, H. (1974): Biostratigraphie der Germanischen Mitteltrias. - Freib. Forsch.-H., C 280: Teil I, II, 15 Tab. als Anl.; Leipzig.
- KOZUR, H. (1975): Probleme der Triasgliederung und Parallelisierung der germanischen und tethyalen Gliederung. Teil II: Anschluß der germanischen Trias an die internationale Triasgliederung. - Freib. Forsch.-H. C 304: 51-77, 1 Taf.; Leipzig.
- KRUMBEIN, W. C. & SLOSS, L. L. (1963): Stratigraphy and Sedimentation. - 2nd ed.: 660 S.; San Francisco (Freeman).
- KÜHN, R. (1968): Geochemistry of the German Potash Deposits. - Geol. Soc. Amer. Spec. Pap., 88: 327-504, 5 Abb., 13 Tab., 3 Taf.; New York.
- LAEMMLEN, M. (1975): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25 000, Bl. 5225 Geisa. - 272 S., 39 Abb., 11 Tab., 1 Taf.; Wiesbaden.
- LAND, L. S. (1980): The isotopic and trace element geochemistry of dolomite: the state of art. - In: ZENGER, D. H.; DUNHAM, J. B. & ETHINGTON, R. L. (eds.): Concepts and Models of Dolomitization. - SEPM Spec. Publ., 28: 87-110, 6 Abb., 1 Tab.; Tulsa, Oklahoma.
- LAND, L. S. & HOOPS, G. K. (1973): Sodium in carbonate sediments and rocks: A possible index to the salinity of diagenetic solution. - J. Sediment. Petrol., 43, 3: 614-617, 4 Tab.; Tulsa.
- LANGBEIN, R. (1967a): Zur Petrographie des Mittleren Muschelkalkes. - Geologie, 16, 2: 169-180, 6 Abb., 1 Tab.; Berlin.
- LANGBEIN, R. (1967b): Bemerkungen zur Petrographie des Unteren Muschelkalkes in Thüringen. - Geologie, 16, 1: 29-40, 5 Abb.; Berlin.
- LANGBEIN, R. (1979): Petrologische Aspekte der Anhydritbildung. - Z. geol. Wiss., 7, 7: 913-926, 7 Abb.; Berlin.
- LANGBEIN, R. (1983): Über diagenetisch entstandene Gefüge in Gips- und Anhydritgesteinen. - Z. geol. Wiss., 11, 12: 1453-1469, 15 Abb.; Berlin.
- LANGBEIN, R. (1984): Über subrosionsbedingte Gefüge in Anhydrit- und Gipsgesteinen. - Z. geol. Wiss., 12, 3: 349-362, 12 Abb.; Berlin.
- LANGBEIN, R. (1987): The Zechstein sulfates: the state of art. - In: PERYT, T. M. (ed.): The Zechstein Facies in Europe.- Lecture Notes in Earth Sciences, 10: 143-188, 22 Abb., 3 Tab. ; Heidelberg (Springer).
- LANGBEIN, R. & STEPANSKI, M. (1996): Beiträge zur Geochemie des Muschelkalks in Thüringen. - Geowiss. Mitt. von Thüringen, Bh., 5: 111-129, 7 Abb.; Weimar.
- LANGER, A. (1989): Lithostratigraphische, technologische und geochemische Untersuchungen im Muschelkalk des Osnabrücker Berglandes. - Mitt. geol. Inst. Univ. Hannover, 29: 114 S., 16 Abb., 22 Tab., 5 Taf.; Hannover.
- LIPPmann, F. & PANKAU, H.-G. (1988): Der Mineralbestand des mittleren Muschelkalkes von Nagold; Württemberg. - N. Jb. Miner. Abh., 158: 257-292, 28 Abb., 6 Tab.; Stuttgart.
- LIPPmann, F. & SCHLENKER, B. (1970): Mineralogische Untersuchungen am Oberen Muschelkalk von Haigerloch (Hohenzollern). - N. Jb. Miner. Abh., 113, 1: 68-90, 8 Abb., 4 Tab.; Stuttgart.

- LOPEZ-GOMEZ, J., ARCHE, A., CALVET, F. & GOY, A. (2000): Epicontinental marin carbonate sediments of the Middle and Upper Triassic in the westernmost Part of the Tethys Sea, Iberian Peninsula. - Zbl. Geol. Paläont., Teil 1, 1998, 9-10: 1033-1084, 11 Abb.; Stuttgart.
- LOTZE, F. (1933): Die Verbreitung der roten Gesteine im Mittleren Muschelkalk Westdeutschlands. - N. Jb. Miner. Abh., 69: 388-396, 2 Abb.; Stuttgart.
- LUMBSEN, D. N. & CHIMAHUSKY, J. S. (1980): Relationship between dolomite nonstoometry and carbonate facies parameters. - In: ZENGER, D. H.; DUNHAM, J. B. & ETHINGTON, R. L. (eds.): Concepts and Models of Dolomitization. - SEPM Spec. Publ. 28: 123-137, 16 Abb., 3 Tab.; Tulsa, Oklahoma.
- MACHEL, H. G. & MOUNTJOY, E. W. (1986): Chemistry and environment of dolomitisation - a reappraisal. - Earth-Sci. Rev., 23: 175-222, 10 Abb., 2 Tab.; Amsterdam.
- MAIKLEM, W. R., BEBOUT, D. G. & GLAISTER, R. P. (1969): Classification of anhydrite - A practical approach. - Bull. canad. Petroleum Geol., 17/2: 194 - 233, 3 Abb., 16 Taf.; Calgary.
- MAQSUD, N. (1986): Litho- und Biostratigraphie des Unterlen, Mittleren und Oberen Muschelkalkes im Grenzbereich Bauland-Odenwald. - Mainzer geowiss. Mitt., 15: 7-64, 40 Abb., 2 Tab.; Mainz.
- MENNING, M. (1995): A numerical time scale for the Permian and Triassic period: an integrated time analysis. - In: SCHOLLE, P., PERYT, T., & ULMER-SCHOLLE, D. S. (eds.): The Permian of Northern Pangaea, Vol. 1: 77-97, 5 Abb.; Heidelberg, New York (Springer).
- MERZ, G. (1987): Zur Petrographie, Stratigraphie, Paläogeographie und Hydrogeologie des Muschelkalks (Trias) im Thüringer Becken. - Z. geol. Wiss., 15, 4: 457-473, 9 Abb., 1 Tab.; Berlin.
- MITCHUM, R. M. (1977): Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 11: Glossary of terms used in seismic stratigraphy. - In: PAYTON, C. E. (ed.): Seismic stratigraphy - Applications to Hydrocarbon Exploration: AAPG Mem., 26: 205-213; Tulsa.
- MITCHUM, R. M. & WAGONER, J. C. VAN (1991): High-frequency sequences and their stacking patterns: sequence-stratigraphic evidence of high-frequency eustatic cycles. - Sediment. Geol., 70, 2-4: 131-160, 19 Abb., 2 Tab.; Amsterdam.
- MONTY, C. L. V. & LAER, P. VAN (1984): Experimental radial calcite ooids of microbial origin and fossil counterparts. - 5 th European Regional meeting of Sedimentology, IAS, Abstract of paper: 296-297.
- MORGENROTH, V. (1971): Der Muschelkalk Südhüringen. - In: Die Entwicklung des tieferen Tafeldeckgebirges und dessen Beziehung zum Unterbau (Thüringer Wald und südwestthüringisches Triasgebiet). - Kurzref. Exkursionsf. Tagg. Deutsch. Ges. Geol. Wiss., 442 - 448; Berlin.
- MORROW, D. W. (1978): The influence of the Mg/Ca ratio and the salinity on dolomitization in evaporite basins. - Bull. Can. Petrol. Geol., 26: 389-392; 1 Abb., 1 Tab.; Calgary.
- MOSTLER, H. (1993): Das Germanische Muschelkalkbecken und seine Beziehungen zum tethyalen Muschelkalkmeer. - In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (eds.): Muschelkalk, Schöntaler Symposium 1991: 11-14, 1 Abb.; Stuttgart, Korb (Goldschnecke).
- M'RABET, A. (1981): Differentiation of environments of dolomite formation, Lower Cretaceous of Central Tunisia. - Sedimentology, 28, 3: 331-352, 16 Abb., 1 Tab.; London.
- MÜLLER, G. (1962): Zur Geochemie des Strontiums in ozeanischen Sedimenten unter besonderer Berücksichtigung der sedimentären Coelestinlagerstätte Hemmelte-West (Süd-Oldenburg). - Geologie Beih., 35: 1-90, 34 Abb., 38 Tab.; Berlin.
- MÜLLER, G. & PUCHELT, H. (1961): Die Bildung von Coelestin (SrSO_4) aus Meerwasser. - Naturwissenschaften, 48: 301-302, 1 Abb.; Berlin.

- MURRAY, R. C. (1964): Preservation of primary structure and fabrics in dolomite. - In: NEWELL, N. D. & IMBRIE, J. (eds.): Approaches to paleoecology: 388-403, 9 Abb.; New York.
- NACSN [NORTH AMERICAN COMMISSION ON STRATIGRAPHIC NOMENCLATURE] (1983): North American stratigraphic Code. - Amer. Ass. Petrol Geol. Bull., 67, 5: 841-875, 11 Abb., 2 Tab.; Tulsa.
- NIEMANN, H. (1960): Untersuchungen am grauen Salzton der Grube „Königshall-Hindenburg“, Reyerhausen bei Göttingen. - Beitr. Miner. Petrogr., 7, 3: 137-165, 7 Abb., 15 Tab.; Berlin.
- OGURELEC, B. & ROTHE, P. (1979): Diagenetische Entwicklung und faziesabhängige Na-Verteilung in Karbonatgesteinen Sloweniens. - Geol. Rdsch., 68, 3: 965-978, 3 Abb., 2 Taf., 1 Tab.; Stuttgart (F. Enke).
- PÄTZ, W. (1965): Zur Stratigraphie des Muschelkalks der Forstberg-Antiklinale bei Mühlhausen nach Bohrergebnissen. - Geologie, 14, 7: 840-850, 5 Abb.; Berlin.
- PATZELT, G. (1988): Die Trias von Nordwestthüringen. - Exkursionsf. Tgg. Ges. geol. Wiss. Okt. 1988; Mühlhausen.
- PEARCE, T. J. & JARVIS, I. (1995): High-resolution Chemostratigraphy of Quartary distal turbidites: a case study of new methods for the correlation of barren strata. - In: DUNAY, R. E, HAILWOOD, E. A. (Eds.): Non-biostratigraphical Methods of Dating and Correlation. - Spec. Publ. Geol. Soc. London, 89: 107-143; London.
- PEARCE, T. J., WRAY, D. S., WRIGHT, D. K. & BESLY, B. M. (1997): Chemostratigraphy and provenance of Westphalian C/D sequences. - Terra Nova (EUG 9 Abstract Supplement 1), 9: 595; Oxford.
- PERYT, T. M., PIERRE, C. & GRYNIV, S. P. (1998): Origin of Polyhalit deposits in the Zechstein (Upper Permian) Zdrada Platform (northern Poland). - Sedimentology, 45: 565-578, 12 Abb., 1 Tab.; London.
- PIERRE, C. (1983): Polyhalite Replacement After Gypsum at Ojo de Liebre Lagoon (Baja California, Mexico): An Early Diagenesis by Mixing of Marine Brines and Continental Waters. - In: SCHREIBER, B. C. & HARNER, L. (eds.): Sixth International Symposium on Salt, I: 257-265, 5 Abb., 1 Tab.; Alexandria, Virginia.
- PILKEY, O. H. & NOBLE, D. (1966): Carbonate and clay mineralogy of the Persian Gulf. - Deep-Sea Res., 13, 1: 1-16, 14 Abb., 1 Tab.; Oxford.
- RACEY, A., LOVE, M. A., BOBOLECKI, R. M. & WALSH, J. N. (1995): The use of chemical element analysis in the study of biostratigraphically barren sequences: an example from the Triassic of the central North Sea (UKCS). - In: DUNAY, R. E, HAILWOOD, E. A. (Eds.): Non-biostratigraphical Methods of Dating and Correlation. - Spec. Publ. Geol. Soc. London, 89: 69-105; London.
- RADZINSKI, K.-H. (1971): Der Mittlere und Obere Muschelkalk der Querfurter Mulde. - Geologie, 20: 133-147, 3 Abb., 1 Tab.; Berlin.
- RAUP, O. B. & HITE, R. J. (1996): Bromine Geochemistry of Chloride Rocks of the Middle Pennsylvanian Paradox Formation of the Hermosa Group, Paradox Basin, Utah and Colorado. - U.S. Geological Survey bulletin 2000-M: 117 S., 141 Abb., 104 Tab.; Washington.
- REBELLE, M. & STEMPFL, C. V. (in Vorb.): Chemische Charakterisierung von Salzlösungen und Stein-salzformationen in der Asse-Struktur mit Betonung auf die Herkunft des Salzgehaltes der salzigen Grundwässer innerhalb des Unteren Muschelkalks und Oberen Buntsandsteins des Deckgebirges.
- REIS, O. M. (1901): Der Mittlere und Untere Muschelkalk im Bereich der Steinsalzbohrungen zwischen Burgbernheim und Schweinfurt. - Geogn. Jh., 14: 23-127, 4 Abb., 9 Taf.; München.

- REITZ, E. (1985): Palynologie der Trias in Nordhessen und Südniedersachsen. - Geol. Abh. Hessen, 86: 36 S., 11 Abb., 11 Taf.; Wiesbaden.
- RICHTER, D. K. (1984): Zur Zusammensetzung und Diagenese natürlicher Mg-Calcite. - Bochumer geol. u. geotechn. Arb., 15: 310 S., 64 Abb., 12 Tab., 5. Taf.; Bochum.
- RICHTER, G. (1936): Der Sedimentationsraum des Unteren Keupers zwischen Harz und Thüringer Wald. - Festschr. H. Stille: 116-136, 2 Taf.; Stuttgart (Enke).
- RIDER, M. (1996): The geological Interpretation of Well Logs. - 280 S.; Caithness (Whittles Publ.).
- RIECH, V.: Zur Coelestinbildung im germanischen Muschelkalk Süddeutschlands. - Geol. Jb., D29: 3-77, 21 Abb., 4 Taf.; Hannover.
- RIEDEL, A. (1918): Beiträge zur Paläontologie und Stratigraphie der Ceratiten des deutschen Oberen Muschelkalks. - Jb. Kgl. Preuss. geol. L.-Anst., 37: 1-116, 5 Abb., 18 Taf.; Berlin.
- RÖHL, U. (1988): Multistratigraphische Zyklenstrukturierung im Oberen Muschelkalk Nord- und Mittedeutschlands. - Diss. Univ. Bonn, 285 S., 73 Abb., 62 Anl.; Bonn.
- RÖHL, U. (1993): Sequenzstratigraphie im zyklisch gegliederten Oberen Muschelkalk Norddeutschlands. - In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (eds.): Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991: 29-36, 7 Abb.; Stuttgart (Goldschneck).
- RÖHLING, H.-G. (1986): Die Gliederung des Unteren und Mittleren Buntsandsteins nach Bohrlochmessungen (Gamma-Ray und Sonic-Log) im Nordwestdeutschen Becken. - Unveröff. Bericht BGR, Archiv-Nr. 100 003: 92 S., 15 Abb., 4 Tab., 18 Anl.; Hannover.
- RÖHLING, H.-G. (1988): Paläogeographie des Unteren und Mittleren Buntsandsteins im Nordwestdeutschen Becken. - Unveröff. Bericht BGR, Archiv-Nr. 104 107: 141 S., 26 Abb., 29 Anl.; Hannover.
- RÖHLING, H.-G. (1991a): A lithostratigraphic subdivision of the Early Triassic in the Northwest German Lowlands and the German Sector of the North Sea, based on Gamma Ray and Sonic Log. - Geol. Jb., A 119: 3-23, 1 Abb., 12 Anl.; Hannover.
- RÖHLING, H.-G. (1991b): Lithostratigraphie und Paläogeographie des Unteren und Mittleren Buntsandsteins im Nordwestdeutschen Becken - eine Analyse der Schichtenfolge mit Hilfe geophysikalischer Bohrlochmessungen (Gamma-Ray und Sonic Log). - Unveröff. Diss. Univ. Heidelberg: 336 S., 106 Abb., 14 Tab., 38 Anl.; Heidelberg.
- RÖHLING, H.-G. (1993): Der Untere Buntsandstein in Nordwest- und Nordostdeutschland - ein Beitrag zur Vereinheitlichung der stratigraphischen Nomenklatur. - Geol. Jb., A 142: 149-183, 11 Abb., 9 Tab.; Hannover.
- ROSENFELD, U. & THIELE, I. (1992): Der Untere Muschelkalk am Nordrand der Rheinischen Masse: Fazies und Mächtigkeiten (Trias, NW-Deutschland). - N. Jb. Geol. Paläont. Mh., 1992, 8: 487-512, 8 Abb.; Stuttgart.
- ROTHER, M. (1993): Die Wüste im Wasser: Zur Fazies, Geochemie und Diagenese des Mittleren Muschelkalks in N-Bayern. - In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (eds.): Muschelkalk, Schöntaler Symposium 1991: 111-115, 7 Abb.; Stuttgart, Korb (Goldschneck).
- RÜFFER, T. (1995): Entwicklung einer Karbonat-Plattform: Fazies, Kontrollfaktoren und Sequenzstratigraphie in der Mitteltrias der westlichen Kalkalpen (Tirol, Bayern). - Gaea heidelbergensis, 1: 282 S., 37 Abb., 27 Tab., 7 Taf.; Heidelberg.
- SARG, J. F. (1988): Carbonate Sequence Stratigraphy. - In: WILGUS, C. W., HASTINGS, B. S., KENDALL, C. G. S. C., POSAMENTIER, H. W., ROSS, C. A. & WAGONER, J. C. VAN (eds.): Sea-level changes: an integrated approach. - SEPM Special Publication, 42: 155-181, 19 Abb.; Tulsa.

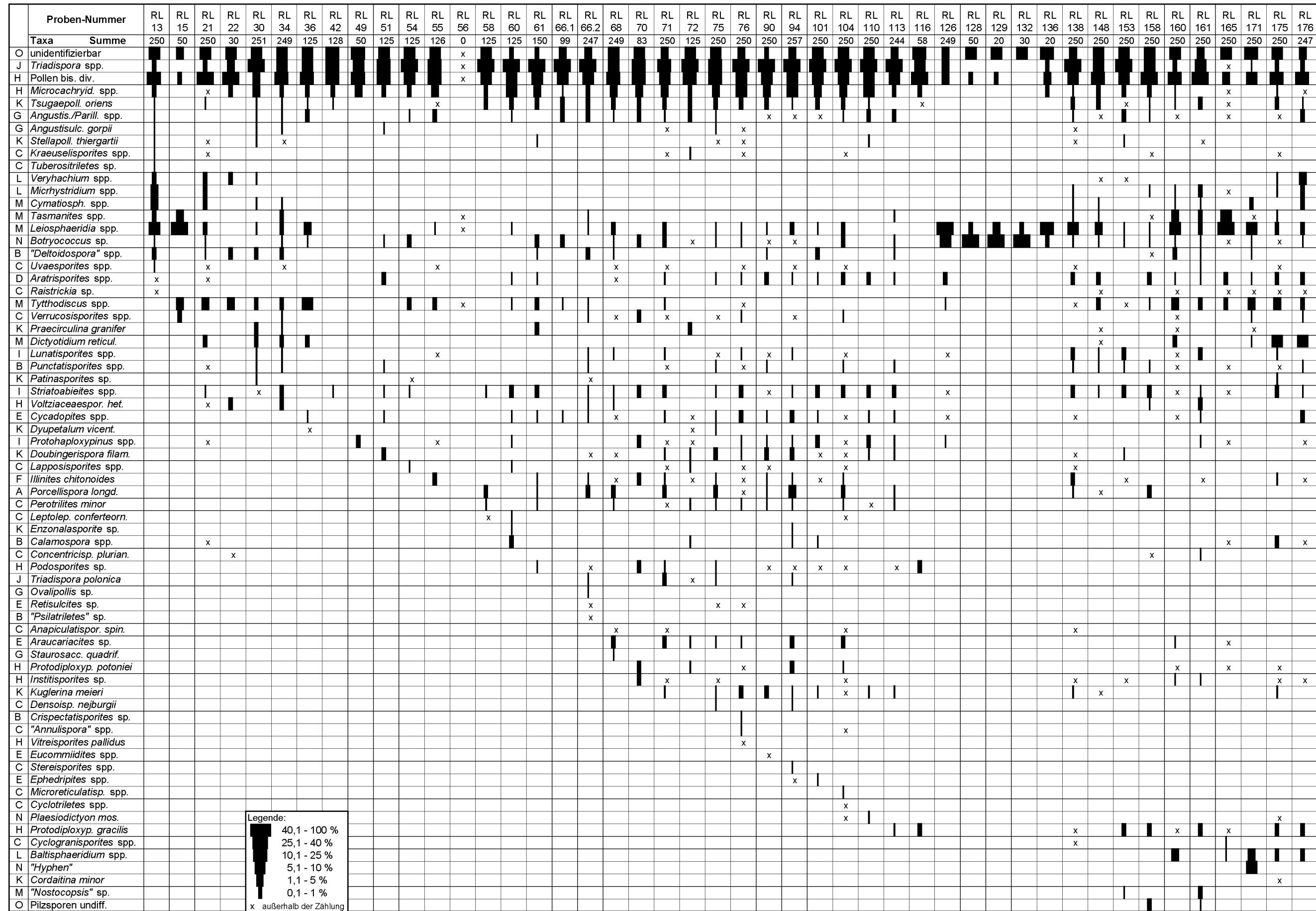
- SCHACHL, E. (1954): Das Muschelkalksalz in Südwestdeutschland. - N. Jb. Geol. Paläont., Abh., 98, 3: 309-394, 41 Abb., 1 Tab., 6 Taf.; Stuttgart.
- SCHLAGER, W. (1991): Secar - Sedimentology and Sequence stratigraphy of reefs and carbonate platforms. - A short course for the Geologische Vereinigung, Co. W. Schlager, May 1991, Amsterdam: 104 S; Amsterdam.
- SCHLUMBERGER (1982): Natural gamma ray spectrometry - essentials of N.G.S. interpretations. - Schlumberger Ltd, 69 S.; New York.
- SCHMITZ, J. (1985): Die Mittlere Kreide (Oberalb-Vracon) am Nordrand des westlichen Hohen Atlas in Marokko (Mikrofazies, Dolomitisierung). - Diss. Univ. Bonn, 541 S., 48 Abb., 27 Taf., 5 Anl.; Bonn.
- SCHREIBER, B. C. & WALKER, D. (1992): Halite pseudomorphs after gypsum: a suggested mechanism. - J. Sediment. Petrol., 62, 1: 61-70, 4 Abb.; Tulsa.
- SCHRÖDER, B. (1964): Gliederungsmöglichkeiten in Muschelkalk und Lettenkohle zwischen Bayreuth und Weiden. - Geol. Bavaria, 53: 12-28, 4 Abb.; München.
- SCHULZE, G. (1964): Erste Ergebnisse geologischer Untersuchungsarbeiten im Gebiet der Scholle von Calvörde. - Z. angewandte Geol., 10, 8: 403-413, 9 Abb.; Berlin.
- SCHWAHN, H.-J. & GAHRMANN, N. (1976): Der Mittlere Muschelkalk im östlichen Subherzyn. - Herzynia, N. F., 13, 3: 332-339, 3 Abb.; Leipzig.
- SCHWARZ, H.-U. (1970): Zur Sedimentologie und Fazies des Unteren Muschelkalkes in Südwestdeutschland und angrenzenden Gebieten. - Diss. Univ. Tübingen, 297 S., 63 Abb., 8 Tab., 26 Taf.; Tübingen.
- SEIDEL, G. (1965): Zur Ausbildung des Muschelkalkes in NW-Thüringen. - Geologie, 14, 1: 58-63, 3 Abb.; Berlin.
- SIBLEY, D. F. (1980): Climatic control of dolomitization, Seroe Domi Formation (Pliocene), Bonaire, N. A.. - In: ZENGER, D. H.; DUNHAM, J. B. & ETHINGTON, R. L. (eds.): Concepts and Models of Dolomitization. - SEPM Spec. Publ. 28: 247-258, 7 Abb.; Tulsa, Oklahoma.
- SIMON, T. (1995): Salz und Salzgewinnung im nördlichen Baden-Württemberg - Geologie-Technik-Geschichte. - Forschungen aus Württembergisch Franken, 42: 440 S., 303 Abb., 32 Tab.; Sigma-Ringen (Jan Thorbecke).
- SIMON, T. (1982): Zur Fazies der orbicularis-Schichten im nördlichen Baden-Württemberg und eine neue Festlegung der Grenze zum Mittleren Muschelkalk. - Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N. F., 64: 117-133, 4 Abb. 1 Tab.; Stuttgart.
- SIMON, T. (1988): Geologische und hydrogeologische Ergebnisse der neuen Solebohrung Bad Rappenau, Baden-Württemberg. - Jh. geol L.-amt Baden-Württ., 30: 479-510, 7 Abb., 4 Taf.; Freiburg.
- SKUPIN, K. (1970): Feinstratigraphische und mikrofazielle Untersuchungen im Unteren Hauptmuschelkalk (Trochitenkalk) des Neckar-Jagst-Kocher-Gebietes. - Arb. Inst. Geol. Paläont. Univ. Stuttgart, N. F., 63: 1-173, 18 Abb., 33 Tab., 8 Taf.; Stuttgart.
- SONNENFELD, P. (1984): Brines and Evaporites. – 613 S.; Orlando.
- SPARFELD, K.-F. (1980): Zur Biostratigraphie und Palökologie der Hauptmuschelkalk- und Lettenkeuper-Folge im östlichen Teil der Calvörder-Scholle. - Z. geol. Wiss., 8, 8: 1079-1093, 4 Taf.; Berlin.
- SPERBER, C. M., WILKINSON, B. H. & PEACOR, D. R. (1984): Rock composition, dolomite stoichiometry and rocks/water reaction in dolomitic carbonate rocks. - J. Geol., 92: 609-622, 13 Abb., 3 Tab.; Chicago.

- STEIN, V. (1968): Stratigraphische Untersuchungen im Unteren Muschelkalk Südniedersachsens. - Z. dt. geol. Ges., Jahrg. 1965, 117: 819-828, 1 Abb., 1 Tab.; Hannover.
- STEININGER, F. F. & PILLER, W. E. (1999): Empfehlungen (Richtlinien zur Handhabung der stratigraphischen Nomenklatur). - Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg, 209: 1-19, 11 Abb., 3 Tab. i. Anh.; Frankfurt a. M..
- STRASSER, A. (1986): Ooids in Purbeck limestones (lowermost Cretaceous) of the Swiss and French Jura. - Sedimentology, 33: 711-727, 11 Abb.; London.
- STROHMEYER, C., VOIGT, E. & ZIMDARS, J. (1996): Sequence stratigraphy and cyclic development of basal Zechstein carbonate-evaporite deposits with emphasis on Zechstein 2 off-platform carbonates (Upper Permian, Northeast Germany). - Sediment. Geol., 102: 33-54, 12 Abb.; Amsterdam (Elsevier).
- SUGDEN, W. (1963): Some Aspects of Sedimentation in Persian Gulf. - J. sediment. Geol., 33, 2: 355-364, 4 Abb.; Tulsa.
- SZULC, J. (1999): Anisian-Carnian evolution of the Germanic basin and its eustasy, tectonic and climatic controls. - Zbl. Geol. Paläont., Teil 1, 1998, 7-8: 813-852, 12 Abb.; Stuttgart.
- SZULC, J. (2000): Middle Triassic evolution of the northern Peri-Tethys area as influenced by early opening of the tethys Ocean. - Ann. Soc. Geol. Pol., 70: 1-48, 30 Abb.; Krakau.
- TAPPAN, H. (1980): The paleobiology of plants protists. - 1028 S.; San Francisco.
- TAPPAN, H. (1982): Extinction or survival: Selectivity and causes of Phanerozoic crises. - Geol. Soc. Am., Spec. Paper, 190: 265-276, 9 Abb., 1 Tab.; Boulder.
- TRUSHEIM, F. (1961): Über Diskordanzen im Mittleren Buntsandstein Norddeutschlands zwischen Ems und Weser. - Erdöl-Z., 77, 9: 361-367, 7 Abb.; Wien-Hamburg.
- TRUSHEIM, F. (1963): Zur Gliederung des Buntsandsteins. - Erdöl-Z., 79, 7: 277-292, 8 Abb.; Hamburg.
- TRUSHEIM, F. (1971): Zur Bildung der Salzlager im Rotliegenden und Mesozoikum Mitteleuropas. - Beih. Geol. Jb., 112: 51 S., 10 Abb., 2 Tab., 6 Taf.; Hannover.
- TUCKER, M. (1991): Sequence stratigraphy of carbonate-evaporite basins: models and application to the Upper Permian (Zechstein) of northeast England and adjoining North Sea. - J. Geol. Soc., London, 148: 1019-1036, 1 Taf., 20 Abb.; London.
- TUCKER, M. E. & WRIGHT, V. P. (1990): Carbonate Sedimentology. - 482 S.; London (Blackwell).
- URLICH, M. (1993): Zur Gliederung des Oberen Muschelkalks in Baden-Württemberg mit Ceratiten. - In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (eds.): Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991: 153-156, 1 Abb.; Stuttgart (Goldschnecke).
- URLICH, M. & MUNDLOS, R. (1990): Zur Ceratitenstratigraphie im Oberen Muschelkalk (Mitteltrias) Nordwürttembergs. - Jh. Ges. Naturk. Württ., 145: 59-74, 2 Abb., 3 Taf., Stuttgart.
- URLICH, M. & MUNDLOS, R. (1980): Revision der Ceratiten aus der atavus-Zone (Oberer Muschelkalk, Oberanis) von SW-Deutschland. - Stuttgarter Beitr. Naturk., B 48: 1-42, 7 Abb., 4 Taf.; Stuttgart.
- URLICH, M. & VATH, U. (1990): Zur Ceratiten-Stratigraphie im Oberen Muschelkalk (Mitteltrias) bei Göttingen (Südniedersachsen). - Geol. Jb. Hessen, 118: 59-74, 3 Taf., 2 Abb.; Wiesbaden.
- USDOWSKI, E. (1973): Das geochemische Verhalten von Strontium bei der Genese und Diagenese von Ca-Carbonat und Ca-Sulfat Mineralen. - Contr. Mineral. Petrol., 38: 177-195, 3 Abb., 12 Tab.; Berlin.

- VAHRENKAMP, V. C. & SWART, P. K. (1990): New distribution coefficient for the incorporation of strontium into dolomite and its implications for the formation of ancient dolomite. - *Geology*, 18: 387-391, 5 Abb.; Boulder.
- VAIL, P. R., AUDEMARD, F., BOWMAN, S. A., EISNER, P. N. & PEREZ-CRUZ, C. (1991): The stratigraphic signatures of tectonic, eustacy and sedimentology - an overview. - In: EINSELE, G., RICKEN, W. & SEILACHER, A. (eds.): *Cycles and Events in Stratigraphy*: 617 - 659, 24 Abb., 1 Tab.; Berlin (Springer).
- VAIL, P. R., MITCHUM, R. M. & THOMSON, S. (1977): Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Tl. 4: global cycles of relative changes of sea level. - In: Payton, C. E. (ed.): *Seismic stratigraphy - applications to hydrocarbon exploration*. - Am. Ass. Petrol. Geol. (AAPG), Mem, 26: 83-97, 7 Abb., 1 Tab.; Tulsa.
- VEIZER, J. (1983): Chemical diagenesis of carbonates; Theory and application of trace element technique. - In: ARTHUR, M. A.; ANDERSON, T. F.; KAPLAN, I. R.; VEIZER, J. & LAND, L. S. (eds.): *Stable isotopes in sedimentary geology*: Soc. Econ. Paleont. Min. Short Course, 10: 1-100, 35 Abb.; Tulsa.
- VEIZER, J. & DEMOVIC, R. (1974): Strontium as a tool in facies analysis. - *J. Sediment. Geol.*, 44: 93-115, 9 Abb., 5 Tab.; Tulsa.
- VEIZER, J., LEMIEUX, J., JONES, B., GIBLING, M. R. & SAVELLE, J. (1977): Sodium: Paleosalinity indicator in ancient carbonate rocks. - *Geology*, 5: 177-179, 2 Abb., 1 Tab.; Boulder.
- VEIZER, J., LEMIEUX, J., JONES, B., GIBLING, M. R. & SAVELLE, J. (1978): Paleosalinity and dolomitization of a Lower Paleozoic carbonate sequence, Somerset and Prince of Wales Island, Arctic Canada. - *Can. J. Earth Sci.*, 15, 9: 1448-1461, 10 Abb., 4 Tab.; Ottawa.
- VISSCHER, H. & BRUGMAN, W. A. (1981): Ranges of selected palynomorphs in the Alpine Triassic of Europe. - *Rev. Palaeobot. Palynol.*, 34, 1: 115 - 128, 5 Tab., 1 Taf.; Amsterdam.
- VISSCHER, H., BRUGMAN, W. A. & HOUTE, M. VAN (1993): Chronostratigraphical and sequencestratigraphical interpretation of the palynomorph record from the Muschelkalk of the Obernsees well, South Germany. - In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (eds.): *Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991*: 145-152, 4 Abb.; Stuttgart (Goldschneck).
- VOLLRATH, P. (1923): Beiträge zur Stratigraphie und Paläogeographie des fränkischen Wellengebirges. - N. Jb. Mineral. Geol. Paläontol., Beil.-Bd., 50: 120-288, 3 Taf.; Stuttgart.
- WAGNER, G. (1913): Beiträge zur Stratigraphie und Bildungsgeschichte des oberen Hauptmuschelkaltes und der unteren Lettenkohle in Franken. - *Geol. Paläont. Abh.*, N. F., 11: 101-128, 7 Abb., 3 Taf.; Jena.
- WAGNER, R. (1897): Beitrag zur genaueren Kenntnis des Muschelkalks bei Jena. - *Abh. kgl. preuß. geol. L.-Anst.*, N.-F., 27: 105 S., 2 Taf., 7 Abb.; Berlin.
- WAGONER, J. C. VAN, POSAMENTIER, H. W., MITCHUM, R. W., VAIL, P. R., SARG, J. F., LOUTIT, T. S. & HARDENBOL, J. (1988): An Overview of the Fundamentals of Sequence Stratigraphy and Key definitions. - In: WILGUS, C. W., HASTINGS, B. S., KENDALL, C. G. ST. C., POSAMENTIER, H. W., ROSS, C. A., WAGONER, J. C. VAN (eds.): *Sea-level changes: an integrated approach*. - SEPM Special Publication, 42: 39-45, 4 Abb.; Tulsa.
- WARREN, J. K. (1989): *Evaporite Sedimentologie : importance in hydrocarbon accumulation*. - 285 S.; Englewood Cliffs (Prentice-Hall).
- WARREN, J. K. (1999): *Evaporites: Their Evolution and Economics*. - 438 S.; Oxford (Blackwell).

- WEDEPOHL, K. G. (1970): Geochemische Daten von sedimentären Karbonaten und Karbonatgesteinen in ihrem faziellen und petrogenetischen Aussagewert. - Verh. Geol. B.-A. 1970, 4: 692-705, 4 Abb., 1 Tab.; Wien.
- WENGER, R. (1957): Die Germanischen Ceratiten. - Palaeontographica, A, 108: 57-129, 44 Abb., 17 Tab.; Stuttgart.
- WHEELER, H. E. (1964): Baselevel, Lithosphere Surface, and Time-Stratigraphy. - Geol. Soc. Amer. Bull., 75: 599-610, 2 Abb.; Boulder.
- WIDMER, TH. (1991): Zur Stratigraphie und Sedimentologie der Anhydritgruppe (Mittlere Trias) in der Region Liestal-Arisdorf (Baselland, Nordschweiz). - Beitr. zur Geologie der Schweiz, Geotechn. Ser., 79: 107 S.; Bern.
- WILD, H. (1968): Das Steinsalzlager des Mittleren Muschelkalks, seine Entstehung, Lagerung und Ausbildung nach alter und neuer Auffassung. - Jb. geol. L.-Amt Baden-Württ., 10: 133-155, 5 Abb.; Freiburg.
- WILSON, J. L. (1975): Carbonate facies in geologic history. – 471 S.; Berlin.
- WIRTH, W. (1957): Beiträge zur Stratigraphie und Paläogeographie des Trochitenkalks im nördwestlichen Baden-Württemberg. - Jh. geol. L.-Amt Baden-Württ., 2: 135-173, 13 Abb., 2 Tab.; Freiburg.
- WOLBURG, J. (1956): Das Profil der Trias im Raum zwischen Ems und Niederrhein. - N. Jb. Geol. Paläont., Mh., 1956, 7: 305-330, 5 Abb.; Stuttgart.
- WOLBURG, J. (1969): Die epirogenetischen Phasen der Muschelkalk- und Keuperentwicklung Nordwestdeutschlands, mit einem Rückblick auf den Buntsandstein. - Geotekt. Forsch., 32: 1-65, 32 Abb., 7 Taf.; Stuttgart.
- WRIGHT, V. P. (1992): A revised classification of limestones. - Sediment. Geol., 76, 3-4: 177-185, 4 Abb.; Amsterdam.
- ZIEGLER, P. A. (1982): Triassic Rifts and Facies Patterns in Western and Central Europe. - Geol. Rdsch., 71, 3: 747-772, 7 Abb.; Stuttgart.
- ZIEGLER, P. A. (1990): Geological atlas of Western and Central Europe. - Shell International Petroleum Maatschappij B. V., 2nd ed.: 130 S., 29 Abb, 40 Anl.; The Hague.
- ZIMMERMAN, (1900): Die Triasformation. - In: WAHNSCHAFFE, F.: Erläuterungen zur geologischen Specialkarte von Preussen und den Thüringischen Staaten, Lieferung 26, Blatt Rüdersdorf. - 2. Aufl., 8-35; Berlin.
- ZWENGER, W. (1993): Die Schichtenfolge: Muschelkalk einschließlich Röt, Sedimentologie - Stratigraphie - Paläontologie. - In: SCHROEDER, J. H. (ed.): Die Struktur Rüdersdorf. - Führer zur Geologie von Berlin und Brandenburg, 1: 37-79, 33 Abb., 3 Taf., 2 erw. Auflage; Berlin.

ANHANG



Tab. 10: Quantitative palynologische Auswertung (nach HEUNISCH 1998)

Proben-Nummer	RL 13	RL 15	RL 21	RL 22	RL 30	RL 34	RL 36	RL 42	RL 49	RL 51	RL 54	RL 55	RL 56	RL 58	RL 60	RL 61	RL 66.1	RL 66.2	RL 68	RL 70	RL 71	RL 72	RL 75	
1 A: Monolete, azonate, acingulate und alete	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	3	12	0	11	0	3
B: Trilete, laevigate	6	0	1	1	1	6	0	0	0	1	0	0	0	0	2	1	0	7	1	0	0	1	1	
C: Trilete, ornamentierte	3	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	2	1	0	1	2	1	0	3	2	
D: Aratrisporites spp.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	
2 E: Monosulcate und tricolpate	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	5	0	6	1	3	
F: Illinites chitonoides	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	2	0	1	1	0	1	
G: Monolete bisaccoide	3	0	0	0	3	2	2	0	0	1	1	3	0	0	1	0	3	6	2	1	2	2	2	
H: Alete bisaccoide	95	2	125	17	35	111	52	39	24	39	28	47	0	35	45	45	24	44	114	31	85	40	104	
I: Taeniate bisaccoide	0	0	1	0	1	4	0	1	1	1	0	0	1	3	2	0	3	3	3	6	0	2		
J: Trilete saccoide	8	0	4	2	135	58	13	48	12	46	58	48	0	64	61	75	58	155	50	24	93	56	81	
K: Monosaccate	3	0	1	0	6	3	1	1	0	2	0	0	0	2	3	10	2	5	4	3	8	9	10	
3 L: Acritarchen	26	0	12	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
M: Prasinophyceen	58	42	51	3	19	16	27	0	0	0	4	5	0	0	2	2	1	3	12	0	6	0	1	
4 N: Mehrzellige Grünalgen	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	2	0	0	0	0	3	2	0	1	1	10	0	1	
5 O: Unbestimmbare Palynomorphe	47	5	54	6	47	47	28	39	13	31	30	20	0	20	4	7	8	17	43	18	21	13	38	
1: Sporen	9	1	1	1	1	7	0	0	0	3	1	0	0	3	5	4	0	11	15	1	12	4	7	
2: Pollen	109	2	131	19	180	178	69	89	37	90	88	101	0	102	114	134	88	216	178	63	201	108	203	
3: Marines Phytoplankton	84	42	63	4	20	16	27	0	0	0	4	5	0	0	2	2	1	3	12	0	6	0	1	
4: Mehrzellige Grünalgen	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	2	0	0	0	3	2	0	1	1	10	0	1		
5: Unbestimmbare Palynomorphe	47	5	54	6	47	47	28	39	13	31	30	20	0	20	4	7	8	17	43	18	21	13	38	
Summe A - O	250	50	250	30	248	249	125	128	50	125	125	126	0	125	125	150	99	247	249	83	250	125	250	
Summe 1 - 5	250	50	250	30	248	249	125	128	50	125	125	126	0	125	125	150	99	247	249	83	250	125	250	

Proben-Nummer	RL 76	RL 90	RL 94	RL 101	RL 104	RL 110	RL 113	RL 116	RL 126	RL 128	RL 129	RL 132	RL 136	RL 138	RL 148	RL 153	RL 158	RL 160	RL 161	RL 165	RL 171	RL 175	RL 176	
1 A: Monolete, azonate, acingulate und alete	0	1	17	0	5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	4	0	0	0	0	0	0
B: Trilete, laevigate	1	3	1	4	1	0	4	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1	1	3	1	0	1	3	2
C: Trilete, ornamentierte	3	1	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	0	1	
D: Aratrisporites spp.	2	5	1	2	12	5	2	0	4	0	0	0	0	0	4	6	0	8	2	2	6	2	5	3
2 E: Monosulcate und tricolpate	5	1	8	2	3	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	3
F: Illinites chitonoides	0	2	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	2	0
G: Monolete bisaccoide	0	0	0	0	1	4	4	4	0	0	0	0	0	0	1	0	6	2	0	0	0	0	0	3
H: Alete bisaccoide	72	55	77	78	51	63	40	28	20	2	1	0	3	35	105	67	135	82	115	15	51	104	97	
I: Taeniate bisaccoide	10	1	4	6	4	9	7	0	1	0	0	0	0	0	8	2	14	8	0	7	0	0	6	2
J: Trilete saccoide	124	154	106	109	115	134	161	13	13	0	0	0	1	143	42	126	28	8	54	0	1	7	9	
K: Monosaccate	8	14	8	7	3	5	3	0	0	0	0	0	0	5	4	3	1	2	4	0	0	6	2	
3 L: Acritarchen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	22	8	1	17	14	34
M: Prasinophyceen	2	2	9	2	6	0	1	0	140	2	2	1	8	30	29	4	2	87	30	195	56	76	72	
4 N: Mehrzellige Grünalgen	2	0	0	0	4	1	1	0	50	36	12	23	1	2	2	2	1+9*	2	1+1*	0	41	0	2	
5 O: Unbestimmbare Palynomorphe	21	11	21	40	41	28	17	17	21	10	5	6	7	14	58	27	50	41	23	32	79	27	17	
1: Sporen	6	10	22	6	21	5	8	0	4	0	0	0	0	0	7	8	1	13	5	5	7	5	8	6
2: Pollen	219	227	205	202	178	216	217	41	34	0	1	0	4	195	153	216	174	93	182	15	52	125	116	
3: Marines Phytoplankton	2	2	9	2	6	0	1	0	140	2	2	1	8	32	29	4	3	109	38	196	73	90	106	
4: Mehrzellige Grünalgen	2	0	0	0	4	1	1	0	50	36	12	23	1	2	2	2	10	2	2	0	41	0	2	
5: Unbestimmbare Palynomorphe	21	11	21	40	41	28	17	17	21	10	5	6	7	14	58	27	5	41	23	32	79	27	17	
Summe A - O	250	250	257	250	250	250	244	58	249	50	20	30	20	250	250	250	250	250	250	250	250	250	247	
Summe 1 - 5	250	250	257	250	250	250	244	58	249	50	20	30	20	250	250	250	250	250	250	250	250	250	247	

Tab. 5: Quantitative Verteilung der Palynomorphen nach Morpho- und Großgruppen (HEUNISCH 1998)

Tab. 12: RFA-Daten ausgewählter Elemente und errechnete Mineralzusammensetzung von Proben der Bohrung Remlingen 7; in Klammern : leicht flüchtige Elemente, LOI: loss on ignition, Glühverlust

Proben-Nr.	Stratigraphie	Zyklus	Gesteinsgruppe	Teufe [m]	MgO [%]	CaO [%]	(SO ₃) (Cl) [%]	SiO ₂ [%]	TiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	MnO [%]	K ₂ O [%]	P ₂ O ₅ [%]	(F) [%]	LOI [%]	Summe [ppm] [%]	Sr [ppm] [%]	Calcit [%]	Dolomit [%]	Anhydrit [%]	unlöslicher Rückstand [%]	Halit [%]	Colestin [%]		
RL1	mu		Tonmergel	754,16	1,79	19,73	0,18	0,03	56,54	0,08	1,59	0,55	0,01	0,21	0,32	0,02	0,044	18,74	99,83	733	32	6	0	62	0	0
RL2	mu		Kalkstein, Dolomit >10%	753,30	5,03	43,34	0,83	0,03	5,73	0,095	2,06	0,87	0,017	0,21	0,24	0,024	0,143	40,56	99,17	6332	65	21	1	11	0	1
RL4	mu		Kalkstein, Dolomit >10%	753,04	13,14	33,04	0,35	0,08	6,55	0,114	2,11	1,42	0,025	0,18	0,19	0,023	0,142	42,55	99,92	199	12	74	1	12	0	1
RL3	mu		Kalkstein, Dolomit >10%	752,39	16,77	29,62	0,63	0,02	5,79	0,098	1,89	1,42	0,027	0,13	0,2	0,022	0,104	42,82	99,54	3486	27	58	1	14	0	0
RL5	mu		Kalkstein, Dolomit >10%	750,14	4,73	44,68	0,50	0,01	5,24	0,087	1,78	0,71	0,015	0,14	0,19	0,018	<0,020	41,45	99,55	2883	69	19	1	11	0	1
RL6	mu		Kalkstein, Dolomit <10%	748,55	0,86	50,67	0,30	0,01	3,92	0,063	1,49	0,49	0,013	0,13	0,19	0,015	0,088	41,5	99,74	1732	89	2	1	9	0	0
RL7	mu		Kalkstein, Dolomit <10%	748,08	0,93	49,65	0,31	0,00	5,42	0,085	1,76	0,58	0,014	0,15	0,33	0,02	<0,020	40,49	99,74	1192	87	2	1	10	0	0
RL8	mu		Kalkstein, Dolomit >10%	747,72	6,22	44,68	0,35	0,01	3,64	0,061	1,36	0,64	0,017	0,12	0,18	0,024	0,137	42,47	99,9	388	65	26	1	8	0	0
RL9	mu		Kalkstein, Dolomit >10%	747,26	9,85	32,69	0,74	0,02	11,81	0,199	3,95	1,54	0,022	0,43	0,74	0,043	0,182	37,72	99,94	190	34	43	1	22	0	0
RL10	mu		Kalkstein, Dolomit >10%	746,79	16,44	28,97	0,99	0,02	6,64	0,088	1,82	1,15	0,024	0,23	0,38	0,031	<0,020	42,52	99,31	4996	11	73	2	13	0	1
RL11	mu		Kalkstein, Dolomit >10%	744,67	19,33	30,02	0,17	0,04	1,87	0,034	0,63	1,06	0,025	0,08	0,06	0,015	<0,020	46,6	99,94	100	7	86	0	7	0	0
RL12	mu		Kalkstein, Dolomit >10%	744,26	14,25	31,20	11,00	1,61	2,7	0,048	0,97	1,14	0,022	1,78	0,49	0,014	<0,020	34,98	100,21	1021	8	63	19	8	3	0
RL13	mu		Kalkstein, Dolomit >10%	743,48	16,29	27,91	0,73	0,07	8,03	0,125	2,78	1,15	0,023	0,34	0,31	0,035	<0,020	42,13	99,92	186	10	72	1	17	0	0
RL14	mu		Kalkstein, Dolomit >10%	743,08	10,08	32,43	0,95	0,02	11,54	0,193	4,1	1,49	0,022	0,38	0,75	0,045	<0,020	37,86	99,86	350	33	44	2	22	0	0
RL15	mu		Kalkstein, Dolomit <10%	742,72	1,95	41,76	0,45	0,02	12,46	0,195	4,21	1,26	0,017	0,43	0,9	0,04	0,067	36,05	99,81	906	70	7	1	22	0	0
RL16	mu		Dolomit-Kalkmergel	742,26	2,97	34,46	0,93	0,04	18,53	0,306	6,36	1,8	0,02	0,6	1,58	0,053	0,124	31,83	99,61	2471	54	11	2	32	0	1
RL17	mu		Tonmergel	741,91	6,20	22,01	1,02	0,04	28,77	0,47	9,15	2,65	0,023	0,87	2,82	0,08	0,121	25,61	99,84	404	24	26	2	48	0	0
RL18	mu		Kalkstein, Dolomit >10%	739,94	17,94	26,94	0,39	0,01	8,22	0,108	2,11	1,48	0,03	0,2	0,42	0,037	<0,020	42	99,89	73	4	80	1	15	0	0
RL19	mu		Kalkstein, Dolomit >10%	739,58	19,54	28,94	0,27	0,03	3,32	0,049	1,04	1,29	0,031	0,07	0,11	0,02	<0,020	45,23	99,94	62	4	87	0	8	0	0
RL20	mu		Kalkstein, Dolomit >10%	739,34	19,95	29,81	1,05	0,05	1,27	0,022	0,41	1,54	0,03	0,06	0,06	0,016	<0,020	45,64	99,91	319	4	89	2	6	0	0
RL21	mu		Kalkstein, Dolomit >10%	738,81	17,84	26,85	2,02	0,07	6,8	0,102	2,23	1,73	0,029	0,28	0,38	0,037	<0,020	41,52	99,89	783	2	79	3	15	0	0
RL22	mm	1	Kalkstein, Dolomit >10%	738,57	20,15	29,72	0,58	0,03	1,33	0,022	0,48	1,33	0,03	0,04	0,05	0,021	<0,020	46,14	99,92	68	4	90	1	6	0	0
RL23	mm	1	Kalkstein, Dolomit >10%	738,26	16,72	24,44	0,57	0,01	12,07	0,18	3,79	1,89	0,028	0,36	0,71	0,044	<0,020	39,05	99,87	70	3	74	1	22	0	0
RL24	mm	1	Kalkstein, Dolomit >10%	737,38	17,84	25,96	0,64	0,03	8,44	0,142	2,74	1,58	0,028	0,31	0,45	0,037	0,069	41,67	99,93	68	2	79	1	17	0	0
RL25	mm	1	Kalkstein, Dolomit >10%	736,49	18,47	27,06	0,97	0,04	6,47	0,104	2,1	1,41	0,026	0,32	0,29	0,032	0,056	42,59	99,94	102	2	82	2	14	0	0
RL26	mm	1	Kalkstein, Dolomit >10%	736,12	16,57	28,03	5,62	0,05	7,55	0,103	1,99	1,32	0,024	0,23	0,53	0,034	0,082	37,73	99,91	288	3	74	10	14	0	0
RL27	mm	1	Kalkstein, Dolomit >10%	736,00	19,84	29,58	0,89	0,02	2,23	0,034	0,68	1,18	0,028	0,06	0,1	0,021	<0,020	45,27	99,94	91	4	88	2	6	0	0
RL28	mm	1	Kalkstein, Dolomit >10%	735,18	17,25	25,00	0,73	0,01	11,15	0,16	3,27	1,72	0,029	0,29	0,81	0,05	0,061	39,4	99,93	71	2	77	1	20	0	0
RL29	mm	1	Kalkstein, Dolomit >10%	734,89	17,20	25,83	1,67	0,03	9,76	0,13	2,68	1,5	0,029	0,34	0,69	0,045	0,059	39,74	99,7	1947	3	76	3	18	0	0
RL30	mm	1	Kalkstein, Dolomit >10%	734,43	18,49	27,07	1,76	0,04	6,43	0,072	1,46	1,66	0,028	0,22	0,36	0,029	0,055	41,83	99,5	3640	1	82	3	12	0	1
RL31	mm	1	Dolomit	734,21	16,05	24,49	3,26	0,05	13,19	0,172	3,41	1,48	0,025	0,38	0,98	0,039	0,049	36,06	99,64	2227	0	73	6	21	0	0
RL32	mm	1	Dolomit	733,65	16,07	23,81	2,35	0,06	13,74	0,207	3,97	1,63	0,026	0,54	1,07	0,042	0,044	36,35	99,91	144	0	73	4	23	0	0

Proben-Nr.	Strati-graphie	Zyklus	Gesteinsgruppe	Teufe [m]	MgO [%]	CaO [%]	(SO ₃) [%]	(Cl) [%]	SiO ₂ [%]	TiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	MnO [%]	Na ₂ O [%]	K ₂ O [%]	P ₂ O ₅ [%]	F [%]	LOI [%]	Summe [%]	Sr [ppm]	Calcit [%]	Dolomit [%]	Anhydrit [%]	unlöslicher Rückstand [%]	Halt Colestin [%]	
RL33	mm	1	Kalkstein, Dolomit >10%	732,67	14,18	27,08	7,65	0,18	13,32	0,104	1,99	1	0,023	0,53	0,6	0,994	0,192	32,05	99,9	1075	5	63	13	20	0	0
RL34	mm	1	Dolomit	731,54	17,48	25,50	2,09	0,03	10,11	0,153	3,21	1,19	0,023	0,33	0,87	0,046	0,061	38,81	99,91	194	0	79	4	17	0	0
RL35	mm	1	Dolomit	731,15	17,06	25,16	4,09	0,05	9,15	0,112	2,22	0,86	0,021	0,31	0,6	0,04	0,038	37,64	97,35	21783	0	73	7	15	0	5
RL36	mm	1	Dolomit	731,03	17,76	25,47	1,36	0,02	9,53	0,141	3,17	1,18	0,022	0,3	0,79	0,041	<0,020	40,04	99,83	645	0	81	2	17	0	0
RL37	mm	1	Dolomit	729,62	18,07	26,33	1,78	0,03	8,16	0,119	2,43	1,02	0,022	0,25	0,65	0,036	<0,020	40,62	99,52	3246	0	82	3	14	0	1
RL38	mm	1	Dolomit	729,26	18,37	26,29	1,13	0,02	8,22	0,124	2,37	1,02	0,024	0,21	0,64	0,037	<0,020	41,12	99,57	2786	0	84	2	14	0	1
RL39	mm	1	Dolomit	727,74	17,58	24,64	0,58	0,02	10,41	0,166	3,68	1,49	0,031	0,35	0,84	0,061	<0,020	40,07	99,92	240	0	80	1	19	0	0
RL40	mm	2	Anhydrit	727,22	4,40	31,84	36,94	0,00	10,41	0,151	3,22	1,07	0,016	0,31	1,1	0,046	0,02	10,08	99,61	2227	0	20	63	17	0	0
RL41	mm	2	Dolomit-Anhydritgestein	726,87	9,10	29,37	23,90	0,07	9,91	0,137	3,48	1,19	0,023	0,33	1,13	0,041	0,118	20,9	99,7	1923	0	42	41	18	0	0
RL42	mm	2	Anhydrit	726,35	1,06	39,59	53,63	0,01	1,5	0,023	0,61	0,21	0,005	0,11	0,08	0,012	<0,020	2,82	99,66	1704	2	3	91	4	0	0
RL43	mm	2	Anhydrit	725,37	1,16	39,21	52,95	0,01	1,92	0,028	0,73	0,26	0,005	0,13	0,13	0,013	0,038	3	99,58	2789	2	3	90	4	0	1
RL44	mm	2	Anhydrit	725,20	0,63	39,86	54,67	0,01	1,61	0,024	0,56	0,16	0,004	0,15	0,16	0,012	0,066	1,84	99,75	1489	2	1	93	4	0	0
RL45	mm	2	Anhydrit	724,14	3,71	36,89	44,99	0,26	2,5	0,034	0,85	0,38	0,01	0,63	0,2	0,019	0,02	9,27	99,76	1638	2	15	77	7	0	0
RL46	mm	3	Anhydrit-Mergel	722,75	10,73	24,04	15,20	0,07	16,35	0,234	5,67	2,21	0,032	0,5	1,88	0,062	0,048	22,8	99,82	815	0	44	26	30	0	0
RL47	mm	3	Dolomit-Anhydritgestein	722,16	6,63	35,04	36,35	0,05	3,85	0,06	1,24	0,7	0,015	0,14	0,27	0,023	0,069	15,32	99,75	1541	2	28	62	8	0	0
RL48	mm	3	Dolomit-Anhydritgestein	721,78	7,09	33,82	34,59	0,05	4,58	0,062	1,51	0,64	0,015	0,18	0,38	0,028	0,062	16,16	99,16	6299	0	32	59	8	0	1
RL49	mm	3	Anhydrit	721,09	0,09	41,04	57,21	0,00	0,37	0,008	0,17	0,05	0,002	0,06	0,05	0,005	<0,020	0,72	99,78	1276	2	0	97	1	0	0
RL50	mm	3	Anhydrit	718,73	0,10	40,97	56,61	0,00	0,42	0,009	0,19	0,05	0,003	0,07	0,05	0,005	0,058	1,21	99,75	1415	2	0	96	1	0	0
RL58	mm	4	Anhydrit	705,57	0,46	35,79	46,30	1,62	5,45	0,041	1,01	0,19	0,005	2,71	0,61	0,014	0,038	5,13	99,87	3315	5	1	80	11	3	1
RL59	mm	4	Anhydrit	674,98	3,71	33,93	41,95	2,68	3,21	0,05	0,93	0,34	0,011	3,04	0,61	0,017	0,173	9,52	100,18	3222	0	15	71	9	4	1
RL62	mm	5	Anhydrit	669,32	6,07	29,68	33,23	0,05	10,53	0,145	3,58	1,43	0,022	0,53	1	0,05	0,035	12,65	99	7255	0	21	57	21	0	2
RL63	mm	5	Anhydrit	669,04	5,21	31,97	37,33	0,11	7,55	0,106	2,49	0,99	0,019	0,6	0,66	0,038	<0,020	11,85	98,92	7933	0	19	63	16	0	2
RL64	mm	5	Anhydrit	667,84	5,23	28,83	31,62	1,52	10,76	0,131	2,98	0,81	0,022	2,85	1,25	0,037	0,039	13,76	99,84	3463	0	22	54	21	3	1
RL65	mm	5	Ton-Anhydritgestein	667,55	5,96	25,77	27,10	1,90	13,41	0,185	4,08	1,24	0,025	3,47	1,59	0,05	0,035	14,85	99,67	5409	0	22	46	27	3	1
RL67	mm	5	Tonmergel	663,45	12,77	14,66	0,30	2,05	23,58	0,338	7,49	3,22	0,05	3,49	1,47	0,107	<0,020	30,8	100,32	335	0	48	1	49	3	0
RL68	mm	5	Dolomit-Anhydritgestein	660,32	9,26	28,30	22,98	0,11	11,49	0,163	3,58	1,45	0,034	0,56	0,96	0,048	0,068	20,65	99,66	2269	0	40	39	20	0	0
RL69	mm	5	Anhydrit	659,92	2,17	29,85	39,80	0,01	15,23	0,188	3,94	1,4	0,009	0,88	1,34	0,044	<0,020	4,54	99,38	4093	0	6	68	25	0	1
RL70	mm	5	Ton-Anhydritgestein	657,89	7,21	20,77	21,09	0,04	22,37	0,307	7,54	2,98	0,027	1,51	2,02	0,058	0,028	13,78	99,73	1174	0	20	36	44	0	0
RL71	mm	5	Anhydrit-Mergel	654,68	11,28	25,77	20,30	0,08	12,58	0,178	4,26	2,03	0,032	0,53	0,78	0,049	0,103	21,66	99,63	2550	0	38	35	27	0	1
RL72	mm	5	Anhydrit	653,65	3,26	35,80	45,38	0,01	5,38	0,079	1,74	0,65	0,015	0,25	0,36	0,024	0,024	6,72	99,69	1795	0	13	77	10	0	0
RL73	mm	5	Ton-Anhydritgestein	652,73	3,29	27,51	36,64	0,00	17,4	0,25	5,06	1,87	0,014	0,67	1,19	0,04	<0,020	5,26	99,2	5576	0	6	62	30	0	1
RL74	mm	5	Anhydrit	651,87	2,18	38,02	49,93	0,01	3,35	0,039	0,83	0,36	0,01	0,15	0,12	0,014	<0,020	4,62	99,63	2377	1	10	85	3	0	0
RL75	mm	5	Dolomit-Anhydritgestein	650,99	9,69	30,42	26,85	0,07	7,02	0,108	2,48	1,07	0,031	0,27	0,44	0,057	0,134	21,16	99,8	1342	0	38	46	16	0	0
RL76	mm	5	Anhydrit	650,56	31,59	42,37	0,00	12,67	0,182	4,03	1,32	0,012	0,47	1,17	0,03	0,069	3,94	99,7	1546	0	6	72	22	0	0	
RL77	mm	5	Dolomit-Anhydritgestein	650,45	13,82	27,27	14,73	0,08	10,09	0,151	3,44	1,56	0,039	0,41	0,71	0,069	0,1	27,34	99,81	1048	0	56	25	19	0	0

Proben-Nr.	Strati-graphie	Zyklus	Gesteinsgruppe	Teufe [m]	MgO [%]	CaO [%]	(SO ₃) [%]	(Cl) [%]	SiO ₂ [%]	TiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	MnO [%]	Na ₂ O [%]	K ₂ O [%]	P ₂ O ₅ [%]	(F) [%]	LOI [%]	Summe [ppm]	Sr [%]	Calcit [%]	Dolomit [%]	Anhydrit [%]	unlöslicher Rückstand [%]	Halt Cölestin [%]	
RL78	mm	5	Dolomit	647,17	18,35	23,66	0,45	0,02	12,03	0,182	3,79	1,52	0,033	0,44	0,67	0,045	0,098	38,61	99,9	354	0	77	1	22	0	0
RL79	mm	5	Dolomit	646,71	19,79	26,67	0,26	0,01	6,31	0,101	2,36	1,14	0,033	0,22	0,34	0,03	<0,020	42,61	99,87	106	0	87	0	12	0	0
RL80	mm	5	Dolomit	645,93	19,20	25,65	0,28	0,03	8,28	0,13	2,82	1,15	0,035	0,42	0,35	0,046	0,023	41,48	99,89	103	0	84	0	16	0	0
RL81	mm	5	Dolomit	645,44	18,78	24,16	0,65	0,02	10,13	0,183	3,75	1,54	0,032	0,48	0,55	0,053	0,036	39,54	99,91	103	0	78	1	21	0	0
RL82	mm	5	Dolomit	644,82	19,16	25,42	0,30	0,02	8,62	0,13	2,93	1,19	0,029	0,32	0,45	0,031	0,083	41,25	99,93	110	0	83	1	17	0	0
RL83	mm	5	Kalkstein, Dolomit >10%	644,25	18,43	29,30	5,11	0,06	3,86	0,047	1,15	0,68	0,028	0,28	0,29	0,02	0,023	40,61	99,89	376	1	82	9	8	0	0
RL84,1	mm	5	Dolomit	644,05	18,90	26,65	1,46	0,02	7,8	0,082	2	0,82	0,025	0,23	0,37	0,035	<0,020	41,5	99,89	150	0	84	2	13	0	0
RL84,2	mm	5	Anhydrit	644,02	4,45	36,76	43,54	0,04	2,97	0,029	0,84	0,28	0,01	0,16	0,15	0,013	<0,020	10,46	99,7	1900	1	18	74	7	0	0
RL85	mm	5	Anhydrit	643,29	2,72	37,93	49,08	0,01	2,06	0,029	0,71	0,25	0,009	0,14	0,15	0,014	0,052	6,32	99,47	3880	0	12	83	3	0	1
RL86	mm	5	Dolomit-Anhydritgestein	642,80	13,10	33,05	20,42	0,04	2,81	0,032	0,81	0,37	0,015	0,15	0,17	0,016	0,074	28,74	99,8	1374	2	58	35	5	0	0
RL87	mm	5	Dolomit	642,59	17,99	28,79	6,14	0,09	4,83	0,063	1,46	0,67	0,02	0,26	0,29	0,025	0,021	39,22	99,87	409	0	81	10	9	0	0
RL88	mm	5	Dolomit-Anhydritgestein	640,81	9,71	33,79	29,72	0,03	3,35	0,04	0,94	0,38	0,019	0,13	0,16	0,016	0,101	21,41	99,79	1365	0	43	51	7	0	0
RL89	mm	5	Dolomit-Anhydritgestein	640,71	6,83	34,83	36,80	0,04	3,75	0,049	1,24	0,47	0,018	0,18	0,24	0,019	0,032	15,27	99,77	1268	0	30	63	8	0	0
RL90	mm	6	Tonnergel	639,65	11,66	18,38	12,10	0,05	22,09	0,324	7,85	3,32	0,044	0,94	1,72	0,08	0,071	21,09	99,72	1427	0	33	21	47	0	0
RL91	mm	6	Dolomit-Anhydritgestein	635,76	11,47	26,46	19,07	0,04	12,17	0,182	3,67	1,34	0,031	0,44	0,79	0,056	<0,020	23,48	99,18	6000	0	43	32	23	0	1
RL92	mm	6	Anhydrit	632,56	2,95	37,53	48,34	0,00	2,93	0,042	0,94	0,41	0,011	0,17	0,18	0,017	<0,020	6,11	99,63	2033	0	12	82	5	0	0
RL93	mm	7	Dolomit	629,45	17,53	22,73	3,12	0,10	10,32	0,141	3,21	1,33	0,05	0,51	0,56	0,053	0,022	37,44	97,11	2285	0	68	5	22	0	5
RL94	mm	7	Tonnergel	627,68	11,91	10,83	4,32	0,01	31,19	0,48	11,82	4,75	0,047	1,34	2,63	0,134	<0,020	19,6	99,77	327	0	26	7	67	0	0
RL96	mm	7	Dolomit-Kalkmergel	625,45	16,66	21,59	0,93	0,02	17,01	0,175	4,06	1,79	0,055	0,54	0,75	0,055	0,07	36,06	99,76	1241	0	69	2	30	0	0
RL95	mm	7	Dolomit-Kalkmergel	625,30	17,32	21,87	0,92	0,03	14,55	0,176	4,38	1,86	0,048	0,56	0,49	0,08	0,069	37,47	99,83	710	0	70	2	29	0	0
RL97	mm	7	Dolomit-Kalkmergel	624,66	16,25	19,34	0,81	0,03	18,95	0,243	5,87	2,5	0,048	0,73	0,9	0,102	<0,020	34,1	99,87	162	0	62	1	37	0	0
RL98	mm	7	Anhydrit	623,36	1,15	36,51	46,01	0,00	7,58	0,114	2,37	1,01	0,007	0,36	0,71	0,015	0,081	3,69	99,61	2369	6	3	78	12	0	0
RL99	mm	7	Dolomit-Anhydritgestein	623,12	7,34	33,91	33,33	0,01	6,79	0,079	1,59	0,84	0,023	0,21	0,27	0,041	0,032	14,89	99,36	4408	2	31	57	9	0	1
RL100	mm	7	Anhydrit-Mergel	618,50	7,84	24,40	23,56	0,01	18,58	0,263	6,22	2,58	0,025	0,77	1,44	0,059	0,059	13,94	99,74	1088	0	26	40	34	0	0
RL101	mm	7	Ton-Anhydritgestein	617,18	1,83	32,54	40,44	<0,001	12,68	0,188	4,07	1,54	0,011	0,48	1,04	0,046	<0,020	4,45	99,32	4536	0	0	69	30	0	1
RL102	mm	8	Dolomit-Kalkmergel	612,66	16,59	18,35	1,40	0,03	20,8	0,265	6,19	2,44	0,051	0,71	0,98	0,117	0,098	31,68	99,7	1697	0	57	2	41	0	0
RL103	mm	8	Dolomit-Kalkmergel	612,12	15,25	22,91	8,65	0,09	14,04	0,214	4,84	2,37	0,044	0,81	0,92	0,079	0,123	29,53	99,87	650	0	55	15	30	0	0
RL104	mm	8	Tonstein	611,99	16,70	20,17	4,95	0,05	17,1	0,237	5,47	2,49	0,042	0,65	1,04	0,089	0,189	30,78	99,96	279	0	37	8	55	0	0
RL106	mm	8	Dolomit	606,42	19,40	26,71	1,10	0,03	6,49	0,096	1,79	0,76	0,028	0,22	0,28	0,03	0,167	42,8	99,9	573	0	85	2	13	0	0
RL107	mm	8	Dolomit-Kalkmergel	604,89	15,44	23,70	5,33	0,14	14,85	0,204	4,05	1,48	0,03	0,58	0,92	0,058	0,063	32,92	99,76	1510	0	66	9	25	0	0
RL108	mm	8	Tonnergel	604,54	12,48	16,31	2,22	0,03	30,79	0,287	5,46	1,66	0,03	0,8	1,28	0,065	<0,020	26,86	98,27	12798	0	49	4	45	0	3
RL109	mm	8	Dolomit	602,87	18,85	27,19	2,49	0,07	6,35	0,102	1,89	0,91	0,032	0,22	0,36	0,036	<0,020	41,44	99,94	232	0	84	4	12	0	0
RL110	mm	8	Dolomit	602,56	19,12	26,43	1,49	0,02	7,42	0,109	2,11	0,91	0,029	0,19	0,31	0,034	0,091	41,63	99,9	307	0	83	3	14	0	0
RL111	mm	8	Tonstein	602,16	9,18	5,43	1,13	0,02	39,39	0,917	16,08	5,41	0,045	2,1	4,31	0,168	<0,020	15,56	99,74	189	0	15	2	83	0	0
RL112	mm	8	Dolomit	602,11	20,06	28,04	0,76	0,02	4,3	0,051	1,18	0,62	0,031	0,15	0,19	0,02	0,049	44,44	99,91	162	0	90	1	8	0	0

Proben-Nr.	Strati-graphie	Zyklus	Gesteinsgruppe	Teufe [m]	MgO [%]	CaO [%]	(SO ₃) [%]	(Cl) [%]	SiO ₂ [%]	TiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	MnO [%]	Na ₂ O [%]	K ₂ O [%]	P ₂ O ₅ [%]	(F) [%]	LOI [%]	Summe [%]	Sr [ppm]	Calcit [%]	Dolomit [%]	Anhydrit [%]	unlöslicher Rückstand [%]	Halt Colestin [%]	
RL113	mm	8	Anhydrit	600,05	4,11	33,47	43,65	0,01	3,65	0,042	0,88	0,32	0,013	0,11	0,15	0,013	<0,020	9,14	95,56	33,48	0	10	74	9	0	7
RL114	mm	8	Anhydrit	599,64	1,96	34,45	46,55	0,00	7,65	0,114	2,71	1,02	0,01	0,3	0,64	0,031	<0,020	3,98	99,42	4004	0	6	79	14	0	1
RL115	mm	8	Anhydrit	599,18	4,07	34,89	43,37	0,00	5,42	0,081	1,91	0,83	0,014	0,27	0,32	0,03	0,188	8,16	99,56	3155	0	15	74	11	0	1
RL116	mm	8	Anhydrit	598,73	5,31	36,21	41,52	0,02	3,02	0,044	1,08	0,45	0,018	0,16	0,16	0,019	0,036	11,69	99,74	1537	0	23	71	6	0	0
RL117	mm	8	Dolomit-Kalkmergel	598,28	14,49	24,01	8,54	0,06	14,24	0,208	4,43	1,99	0,059	0,58	1,1	0,06	0,17	29,93	99,87	765	0	59	15	26	0	0
RL118	mm	8	Dolomit	597,96	18,84	25,71	0,37	0,01	9,31	0,098	2,24	1,2	0,058	0,33	0,42	0,038	0,02	41,25	99,89	137	0	84	1	16	0	0
RL119	mm	8	Dolomit	597,68	17,84	23,52	0,42	0,00	12,57	0,15	3,43	1,58	0,052	0,43	0,66	0,052	0,117	39,11	99,94	118	0	76	1	23	0	0
RL120	mm	8	Dolomit	597,31	18,20	25,13	0,54	0,01	11,28	0,095	2,12	1,09	0,05	0,31	0,41	0,039	0,048	40,56	99,88	113	0	81	1	18	0	0
RL121	mm	8	Dolomit-Kalkmergel	597,11	15,02	16,23	0,80	0,03	23,25	0,374	8,45	3,46	0,05	0,84	1,83	0,129	0,101	29,34	99,9	98	0	52	1	47	0	0
RL122	mm	8	Dolomit	596,39	16,78	23,17	1,19	0,03	15,26	0,167	3,71	1,4	0,041	0,51	0,87	0,057	0,08	36,64	99,9	170	0	73	2	25	0	0
RL123	mm	9	Dolomit	596,11	17,77	24,76	0,19	0,00	14,54	0,051	1,48	0,87	0,046	0,16	0,22	0,034	<0,020	39,77	99,89	84	0	81	0	19	0	0
RL124	mm	9	Dolomit	595,08	17,47	23,28	0,40	0,01	12,89	0,152	3,73	1,65	0,05	0,46	0,58	0,044	0,094	39,1	99,91	82	0	76	1	24	0	0
RL125	mm	9	Dolomit	594,54	17,53	23,76	0,27	0,01	14,67	0,099	2,47	1,28	0,051	0,31	0,36	0,045	0,122	38,96	99,93	88	0	78	0	22	0	0
RL126	mm	9	Tonstein	594,48	8,28	6,55	0,39	0,01	44,67	0,626	12,83	4,34	0,039	1,8	3,24	0,181	0,111	16,75	99,82	72	0	21	1	79	0	0
RL127	mm	9	Dolomit-Kalkmergel	593,94	15,79	20,93	1,02	0,02	19,26	0,183	4,3	1,81	0,041	0,57	0,78	0,075	0,129	35,02	99,93	82	0	66	2	32	0	0
RL128	mm	9	Dolomit-Kalkmergel	593,60	16,98	22,22	0,29	0,00	17,37	0,155	3,47	1,66	0,045	0,38	0,51	0,06	0,101	36,68	99,93	61	0	72	0	27	0	0
RL129	mm	9	Dolomit-Kalkmergel	593,38	14,98	18,52	0,76	0,06	21,95	0,28	5,64	2,61	0,052	1,02	0,63	0,092	0,103	33,22	99,92	66	0	59	1	40	0	0
RL130	mm	9	Dolomit-Kalkmergel	593,06	16,85	21,94	0,36	0,01	18,08	0,149	3,36	1,71	0,046	0,39	0,41	0,057	0,121	36,45	99,93	63	0	71	1	28	0	0
RL131	mm	9	Dolomit-Kalkmergel	592,76	14,66	17,82	0,60	0,03	24,34	0,263	6,16	2,55	0,049	0,9	0,95	0,101	<0,020	31,45	99,88	64	0	57	1	42	0	0
RL132	mm	9	Tonstein	592,74	6,31	2,97	0,35	0,01	51,76	0,672	14,17	4,67	0,034	2,22	3,67	0,216	0,132	12,64	99,82	63	0	9	1	90	0	0
RL133	mm	9	Dolomit-Kalkmergel	591,72	14,33	18,72	0,53	0,03	24,35	0,235	5,34	2,14	0,051	0,94	0,95	0,173	<0,020	32,09	99,88	77	0	60	1	39	0	0
RL134	mm	9	Dolomit-Kalkmergel	591,56	16,13	22,13	0,22	0,03	20,95	0,074	2,08	1,37	0,054	0,41	0,31	0,053	0,112	36,02	99,94	53	0	72	0	27	0	0
RL135	mm	9	Dolomit	589,16	17,72	24,66	0,24	0,01	12,73	0,106	2,7	1,55	0,052	0,29	0,24	0,049	0,057	39,51	99,91	72	0	81	0	19	0	0
RL136	mm	9	Dolomit-Kalkmergel	588,72	16,11	22,04	1,00	0,04	16,11	0,187	4,27	1,96	0,044	0,64	0,6	0,099	<0,020	36,78	99,88	116	0	70	2	28	0	0
RL137	mm	9	Dolomit-Kalkmergel	587,89	17,99	24,56	0,36	0,01	11,82	0,109	2,88	1,56	0,048	0,39	0,21	0,051	0,058	39,87	99,92	88	0	80	1	19	0	0
RL138	mm	9	Tonnergel	587,83	12,94	14,74	1,10	0,03	28,7	0,388	8,49	3,52	0,058	1,13	1,67	0,104	0,156	26,8	99,83	80	0	46	2	52	0	0
RL139	mm	9	Dolomit-Kalkmergel	587,65	14,81	18,32	0,47	0,01	23,46	0,291	6,35	2,59	0,049	0,84	1,13	0,086	<0,020	31,44	99,85	81	0	59	1	40	0	0
RL140	mm	9	Dolomit-Kalkmergel	587,06	15,15	18,89	0,52	0,02	22,56	0,261	5,78	2,58	0,048	0,73	1,01	0,081	<0,020	32,24	99,87	78	0	61	1	38	0	0
RL141	mm	9	Dolomit-Kalkmergel	586,81	15,27	18,14	0,66	0,02	21,93	0,284	6,73	3,13	0,049	0,78	1,17	0,09	0,023	31,59	99,87	78	0	58	1	41	0	0
RL142	mm	9	Dolomit-Kalkmergel	586,65	15,47	19,79	0,56	0,02	21,14	0,237	5,43	2,51	0,047	0,7	0,86	0,08	0,102	32,96	99,9	86	0	64	1	35	0	0
RL143	mm	9	Dolomit-Kalkmergel	585,90	16,29	22,06	0,74	0,02	16,24	0,19	4,66	2,3	0,049	0,62	0,61	0,068	0,083	35,96	99,89	99	0	71	1	28	0	0
RL144	mm	9	Tonstein	585,68	6,22	3,65	0,37	0,01	49,05	0,694	14,42	4,6	0,039	2,67	3,64	0,14	<0,020	14,24	99,74	71	0	11	1	88	0	0
RL145	mm	9	Dolomit-Kalkmergel	585,65	14,79	20,15	0,82	0,03	19,44	0,264	5,93	2,48	0,05	0,81	1,01	0,079	0,075	33,99	99,92	81	0	64	1	34	0	0
RL146	mm	9	Kalkstein, Dolomit >10%	585,60	17,17	25,82	0,41	0,01	11,18	0,103	2,64	1,3	0,046	0,33	0,24	0,05	0,12	40,51	99,93	88	4	76	1	19	0	0
RL147	mm	9	Kalkstein, Dolomit >10%	585,46	16,37	24,32	0,43	0,01	14,2	0,148	3,39	1,47	0,043	0,48	0,46	0,067	<0,020	38,5	99,89	93	3	73	1	23	0	0

Proben-Nr.	Stratigraphie	Zyklus	Gesteinsgruppe	Teufe [m]	MgO [%]	Cao [%]	(SO ₃) [%]	(Cl) [%]	SiO ₂ [%]	TiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	MnO [%]	K ₂ O [%]	P ₂ O ₅ [%]	(F) [%]	LOI [%]	Summe Sr [ppm]	Calcit [%]	Dolomit [%]	Anhydrit [%]	unlöslicher Rückstand [%]	Halit [%]	Colestin [%]		
RL149	mm	9	Kalkstein, Dolomit >10%	584,79	17,22	0,62	0,02	9,26	0,092	2,2	1,05	0,041	0,28	0,23	0,068	<0,020	41,59	99,91	118	6	76	1	16	0	0	
RL150	mm	9	Kalkstein, Dolomit >10%	584,72	17,03	27,50	0,55	0,01	9,51	0,086	2,01	1,02	0,04	0,24	0,25	0,063	0,123	41,52	99,95	121	7	76	1	16	0	0
RL151	mm	9	Kalkstein, Dolomit >10%	584,44	16,82	27,86	0,51	0,02	9,91	0,068	1,61	0,92	0,042	0,21	0,15	0,054	<0,020	41,73	99,9	119	9	75	1	16	0	0
RL152	mm	9	Kalkstein, Dolomit >10%	583,73	15,69	24,77	0,67	0,01	13,79	0,177	3,83	1,49	0,036	0,57	0,65	0,055	0,105	38,07	99,92	124	6	69	1	24	0	0
RL153	mm	9	Kalkstein, Dolomit >10%	583,42	16,67	26,76	0,57	0,01	10,61	0,112	2,55	1,18	0,038	0,38	0,32	0,046	<0,020	40,64	99,89	130	7	74	1	18	0	0
RL154	mm	9	Kalkstein, Dolomit >10%	583,13	17,41	28,59	0,45	0,01	7,46	0,091	2,03	0,98	0,038	0,23	0,24	0,038	0,047	42,3	99,91	148	8	77	1	13	0	0
RL155	mm	9	Kalkstein, Dolomit >10%	583,00	17,12	28,68	1,16	0,03	7,3	0,079	1,75	0,93	0,037	0,27	0,26	0,04	0,031	42,23	99,92	155	8	76	2	14	0	0
RL156	mm	9	Kalkstein, Dolomit >10%	582,57	16,67	26,79	0,65	0,02	10,36	0,117	2,77	1,42	0,04	0,37	0,31	0,046	0,063	40,29	99,92	132	7	74	1	18	0	0
RL157	mm	9	Kalkstein, Dolomit >10%	582,18	16,88	26,82	0,86	0,04	9,81	0,115	2,82	1,52	0,04	0,36	0,31	0,049	0,045	40,23	99,9	139	6	75	1	17	0	0
RL158	mm	9	Kalkstein, Dolomit >10%	581,63	10,38	35,92	0,68	0,02	8,45	0,1	2,29	1,28	0,044	0,29	0,26	0,043	<0,020	40,1	99,86	174	39	45	1	15	0	0
RL159	mm	9	Kalkstein, Dolomit >10%	581,51	8,91	37,40	1,25	0,02	8,28	0,095	2,09	1,49	0,04	0,28	0,27	0,057	0,081	39,61	99,87	212	44	38	2	15	0	0
RL160	mm	9	Kalkstein, Dolomit >10%	581,21	12,57	44,68	0,80	0,02	16,04	0,151	4,37	1,68	0,048	0,71	0,55	0,072	<0,020	37,91	119,6	260	38	41	1	20	0	0
RL161	mo		Kalkstein, Dolomit >10%	581,01	2,07	49,89	0,93	0,02	3,4	0,031	0,91	0,39	0,03	0,13	0,11	0,036	0,09	41,88	99,92	285	84	7	2	7	0	0
RL162	mo		Kalkstein, Dolomit >10%	580,70	6,51	41,15	0,38	0,02	7,72	0,085	2,08	0,84	0,033	0,29	0,34	0,042	0,119	40,3	99,91	243	58	27	1	14	0	0
RL163	mo		Kalkstein, Dolomit <10%	580,28	1,27	48,90	8,03	0,01	1,48	0,013	0,27	2,82	0,028	0,04	0,02	0,02	0,102	36,88	99,89	375	75	4	14	7	0	0
RL164	mo		Kalkstein, Dolomit <10%	580,10	1,66	50,40	2,83	0,01	1,8	0,018	0,51	0,88	0,035	0,05	0,05	0,041	0,09	41,51	99,89	371	84	5	5	6	0	0
RL165	mo		Dolomit-Kalkmergel	580,02	11,88	27,69	1,28	0,04	15,76	0,198	4,2	2,09	0,045	0,6	0,58	0,096	0,111	35,34	99,91	181	20	52	2	26	0	0
RL166	mo		Kalkstein, Dolomit <10%	579,74	1,09	50,42	6,69	0,01	1,23	0,013	0,23	0,74	0,038	0,03	0,02	0,032	<0,020	39,3	99,85	466	80	3	11	6	0	0
RL167	mo		Kalkstein, Dolomit <10%	579,51	1,48	50,57	2,72	0,02	2,16	0,028	0,32	0,43	0,04	0,05	0,03	0,048	0,123	41,87	99,88	692	84	4	5	6	0	0
RL168	mo		Kalkstein, Dolomit <10%	579,26	1,16	50,86	5,67	0,02	1,11	0,017	0,19	0,24	0,033	0,02	0,01	0,027	0,035	40,49	99,88	314	82	3	10	5	0	0
RL169	mo		Kalkstein, Dolomit <10%	579,04	1,27	51,79	0,95	0,02	2,07	0,027	0,39	0,46	0,043	0,05	0,03	0,065	0,117	42,65	99,93	320	89	4	2	6	0	0
RL170	mo		Kalkstein, Dolomit <10%	578,79	1,22	52,26	0,75	0,01	1,83	0,017	0,37	0,28	0,04	0,05	0,03	0,036	<0,020	42,97	99,86	402	91	3	1	5	0	0
RL171	mo		Kalkstein, Dolomit <10%	578,44	2,46	47,16	0,44	0,01	6,18	0,071	1,6	0,82	0,036	0,21	0,14	0,042	0,176	40,55	99,9	342	79	9	1	12	0	0
RL172	mo		Kalkstein, Dolomit <10%	577,99	1,16	52,35	0,38	0,01	1,77	0,021	0,36	0,34	0,035	0,05	0,02	0,037	0,061	43,3	99,9	305	91	3	1	5	0	0
RL173	mo		Kalkstein, Dolomit <10%	576,82	1,01	52,66	0,90	0,01	1,36	0,016	0,24	0,21	0,044	0,03	0,02	0,029	0,06	43,32	99,91	273	92	2	2	5	0	0
RL174	mo		Kalkstein, Dolomit <10%	576,55	2,31	47,29	1,34	0,01	5,08	0,05	1,11	1,12	0,077	0,17	0,15	0,46	0,147	40,62	99,94	184	78	8	2	11	0	0
RL175	mo		Tonnergel	576,35	8,64	9,37	1,63	0,02	39,36	0,512	12,01	4,21	0,043	1,49	2,49	0,051	0,047	19,96	99,83	69	0	27	3	70	0	0
RL176	mo		Tonnergel	576,33	8,77	10,30	1,62	0,02	38,13	0,497	11,66	4,14	0,042	1,43	2,4	0,109	0,03	20,69	99,84	79	0	30	3	67	0	0

		Si [%]	Ti [%]	Al [%]	Fe [%]	Mn [%]	Mg [%]	Ca [%]	Na [%]	K [%]	P [%]	Cl [%]	As	Ba	Cr	Cu	Sb	Sc	Sr	V	Y	Zn	Zr	[ppm]	
ingesamt	Mittelwert	5,59	0,09	1,78	0,02	6,90	0,40	0,58	0,03	0,10	5	127	21	19	16	5	1647	27	9	21	37				
	Minimum	0,17	0,00	0,09	0,00	0,05	2,12	0,01	0,00	0,00	1	14	2	5	3	1	53	3	2	2	2				
	Maximum	26,43	0,55	8,51	3,78	0,06	12,15	37,64	2,59	3,58	0,43	2,68	55	2822	125	226	34	16	33148	134	23	249	546		
	Median	4,63	0,07	1,40	0,92	0,02	8,55	19,35	0,24	0,38	0,02	0,02	4	79	15	16	16	4	342	21	9	18	26		
	Standardabw.	4,70	0,08	1,55	0,72	0,01	3,93	7,16	0,47	0,61	0,04	0,36	6	281	22	20	7	3	3816	24	4	21	49		
	Mittelwert	1,60	0,03	0,49	0,52	0,03	0,83	35,57	0,08	0,11	0,03	0,01	10	27	13	19	20	2	544	11	7	11	11		
Kalksteine, Dolomitgehalt <10%	Minimum	0,52	0,01	0,10	0,15	0,01	0,52	29,85	0,01	0,01	0,01	0,00	1	14	2	11	3	1	184	3	2	2	2		
	Maximum	5,82	0,12	2,23	1,97	0,06	1,48	37,64	0,32	0,75	0,20	0,02	55	67	86	36	32	5	1752	33	9	29	41		
	Median	0,97	0,02	0,21	0,34	0,03	0,77	36,04	0,04	0,02	0,01	0,02	4	19	5	18	21	1	371	9	7	10	4		
	Standardabw.	1,40	0,03	0,56	0,48	0,01	0,31	1,97	0,08	0,19	0,05	0,00	16	16	22	6	8	2	426	9	2	7	13		
	Mittelwert	3,78	0,06	1,19	0,90	0,02	9,22	21,58	0,24	0,30	0,03	0,07	4	60	15	24	17	4	758	17	8	21	19		
	Minimum	0,58	0,01	0,22	0,45	0,01	2,85	16,87	0,03	0,04	0,01	0,01	1	20	2	5	3	1	62	3	4	4	2		
Kalksteine, Dolomitgehalt >10%	Maximum	7,50	0,12	2,31	1,32	0,04	12,15	31,93	0,32	0,67	0,43	1,61	21	118	34	226	32	7	6532	39	20	249	84		
	Median	3,80	0,06	1,11	0,93	0,02	10,10	20,23	0,21	0,26	0,02	0,02	4	57	15	16	18	4	185	16	8	16	15		
	Standardabw.	1,74	0,03	0,53	0,22	0,01	2,59	4,14	0,20	0,17	0,06	0,25	3	24	8	36	6	2	1445	10	3	36	16		
	Mittelwert	4,68	0,07	1,43	0,83	0,03	10,93	18,05	0,24	0,43	0,02	0,03	3	133	13	16	15	4	1883	21	9	18	18		
	Minimum	2,01	0,03	0,62	0,43	0,02	9,68	16,25	0,11	0,16	0,01	0,00	1	34	4	5	3	1	72	3	5	6	2		
	Maximum	7,13	0,12	2,10	1,15	0,04	12,10	20,58	0,40	0,89	0,03	0,10	10	1366	26	37	33	8	22565	35	13	31	41		
Tonsteine	Median	4,73	0,07	1,43	0,83	0,02	10,85	17,98	0,23	0,37	0,02	0,02	2	69	13	15	15	4	182	19	9	18	15		
	Standardabw.	1,39	0,02	0,42	0,22	0,01	0,60	1,06	0,08	0,21	0,00	0,03	2	233	6	8	7	2	5656	9	2	6	11		
	Mittelwert	18,75	0,37	6,73	3,12	0,03	5,55	5,56	0,56	0,65	0,07	0,03	14	248	95	34	13	14	181	106	17	49	91		
	Minimum	7,98	0,14	2,90	1,74	0,03	3,75	2,12	0,48	0,86	0,04	0,01	5	90	33	19	9	8	63	40	12	32	24		
	Maximum	24,19	0,55	8,51	3,78	0,03	10,07	14,42	1,98	0,58	0,09	0,05	23	385	125	53	16	16	410	134	23	74	117		
	Median	19,64	0,39	7,26	3,24	0,03	5,06	4,28	0,60	0,86	0,07	0,01	13	243	107	33	14	15	131	117	16	49	102		
Anhydrite	Standardabw.	5,79	0,13	1,97	0,73	0,00	2,33	4,53	0,56	0,93	0,02	0,02	7	97	35	13	3	3	141	34	5	15	34		
	Mittelwert	2,50	0,14	0,87	0,41	0,01	1,71	25,38	0,45	0,39	0,01	0,27	4	230	7	12	18	3	4153	14	7	12	79		
	Minimum	0,17	0,00	0,09	0,03	0,00	0,05	20,60	0,04	0,04	0,00	0,00	1	18	2	5	3	1	1276	3	2	4	22		
	Maximum	7,12	0,11	2,13	1,00	0,02	3,66	28,33	0,26	1,11	0,02	0,68	12	2862	24	27	34	6	33148	34	12	26	546		
	Median	1,64	0,03	0,52	0,28	0,01	1,71	25,73	0,19	0,22	0,01	0,01	4	85	6	12	16	3	2373	10	7	11	60		
	Standardabw.	1,91	0,03	0,64	0,31	0,01	0,09	2,64	0,67	0,35	0,01	0,68	3	564	6	6	9	1	6404	10	3	6	104		
Dolomit-Mergel	Mittelwert	8,94	0,14	2,70	1,55	0,04	9,03	15,24	0,50	0,73	0,04	0,04	6	119	32	19	14	7	440	40	12	30	35		
	Minimum	6,56	0,04	1,10	0,96	0,02	1,79	11,60	0,28	0,26	0,02	0,00	1	46	6	5	3	4	53	19	8	14	14		
	Maximum	11,38	0,22	4,47	2,42	0,05	10,44	24,63	0,76	1,52	0,08	0,14	13	231	53	61	26	11	2471	78	16	49	83		
	Median	8,93	0,13	2,69	1,55	0,04	9,26	15,19	0,50	0,76	0,03	0,03	6	117	33	17	16	3	4144	29	3	17	34		
	Standardabw.	1,56	0,04	0,71	0,35	0,01	1,69	2,69	0,13	0,29	0,01	0,03	3	42	11	10	7	2	653	12	2	7	18		
	Mittelwert	15,57	0,22	4,44	2,18	0,03	5,84	10,83	0,96	1,55	0,04	0,25	9	223	53	26	13	9	1806	62	14	40	56		
Ton-Mergel	Minimum	10,32	0,05	0,84	0,38	0,01	1,03	6,70	0,16	0,27	0,01	1	33	16	5	3	3	69	69	17	7	9			
	Maximum	36,43	0,31	6,36	3,32	0,04	7,80	15,73	0,59	2,34	0,06	0,06	20	766	88	74	21	14	12798	100	17	73	123		
	Median	14,39	0,23	4,49	2,32	0,03	7,03	10,53	0,84	1,43	0,03	0,03	8	152	53	22	13	9	335	50	15	40	63		
	Standardabw.	4,87	0,08	1,80	0,93	0,01	2,27	3,15	0,68	0,66	0,02	0,67	6	220	24	19	5	4	4144	29	3	17	34		
	Mittelwert	3,22	0,06	1,15	0,64	0,02	5,70	22,50	0,20	0,42	0,02	0,05	3	120	13	17	16	3	2622	18	8	15	39		
	Minimum	1,31	0,02	0,43	0,26	0,01	4,00	18,91	0,10	0,13	0,01	0,01	1	37	2	5	3	1	1048	3	4	6	14		
Dolomit-Anhydrit-Gesteine	Maximum	5,68	0,10	1,94	1,09	0,03	8,33	25,04	0,42	0,94	0,03	0,11	11	264	24	27	22	5	6299	36	11	23	88		
	Median	3,17	0,05	0,84	0,59	0,02	5,58	23,62	0,16	0,32	0,02	0,05	2	91	12	18	16	3	1541	19	8	15	33		
	Standardabw.	1,63	0,03	0,62	0,30	0,01	1,50	2,28	0,11	0,28	0,01	0,03	3	120	13	9	6	1	1975	10	2	7	22		
	Mittelwert	7,40	0,13	2,85	1,59	0,02	4,73	19,04	1,14	1,21	0,02	0,49	6	208	29	9	14	7	4174	40	12	25	89		
	Minimum	5,88	0,11	2,25	1,42	0,02	6,80	18,42	0,57	1,18	0,03	0,08	7	140	41	22	30	9	2550	51	14	35	49		
	Median	7,64	0,14	3,00	1,55	0,02	1,80	17,44	0,39	1,20	0,03	0,07	4	138	38	19	17	6	1088	46	13	32	40		
Anhydrit-Mergel	Standardabw.	1,42	0,03	0,54	0,20	0,00	1,11	0,65	0,11	0,46	0,00	0,04	2	21	9	3	11	2	933	10	2	5	8		

Tab. 13: Statistik der Elemente innerhalb des untersuchten Profils der Bohrung Remlingen 7

Elemente	Mittelwert Cluster 1	Mittelwert Cluster 2	Mittelwert Cluster 3	Mittelwert Cluster 4
Si [%]	4,315	9,564	0,544	3,039
Ti [%]	0,062	0,164	0,011	0,052
Al [%]	1,212	3,189	0,239	1,058
Fe [%]	0,841	1,695	0,102	0,534
Mn [%]	0,028	0,032	0,003	0,012
Mg [%]	10,593	8,235	0,367	3,026
Ca [%]	19,096	14,561	28,684	24,078
Na [%]	0,211	0,705	0,077	0,428
K [%]	0,322	1,055	0,078	0,456
P [%]	0,018	0,045	0,004	0,012
SO ₃ [%]	1,209	5,233	55,014	38,544
As [ppm]	2,956	7,059	1,600	4,172
Ba [ppm]	69,956	184,373	31,200	224,828
Cr [ppm]	11,956	38,725	3,600	8,931
Cu [ppm]	14,200	20,510	12,000	13,414
Sb [ppm]	16,644	14,265	23,800	15,948
Sc [ppm]	3,200	7,529	2,800	3,207
Sr [ppm]	892,044	1468,824	1734,600	4045,345
V [ppm]	17,622	47,784	5,300	16,569
Y [ppm]	8,222	12,686	4,600	7,397
Zn [ppm]	21,089	31,412	8,200	14,034
Zr [ppm]	13,978	45,127	33,200	76,172
	N = 45	N = 51	N = 5	N = 29

Tab. 14: Mittlere Elementgehalte für die bei der Clusterzentrenanalayse berechneten 4 Cluster

Elemente	Mittelwert Cluster 1	Mittelwert Cluster 2	Mittelwert Cluster 3
Si [%]	1,371	11,400	4,982
Ti [%]	0,023	0,199	0,077
Al [%]	0,470	3,855	1,515
Fe [%]	0,313	2,020	0,906
Mn [%]	0,011	0,033	0,025
Mg [%]	3,963	7,563	8,789
Ca [%]	25,317	12,603	19,454
Na [%]	0,289	0,888	0,301
K [%]	0,173	1,313	0,471
P [%]	0,007	0,043	0,026
SO ₃ [%]	37,311	5,590	8,688
As [ppm]	2,458	8,212	4,000
Ba [ppm]	180,375	185,758	120,110
Cr [ppm]	3,833	48,152	15,192
Cu [ppm]	11,583	22,273	15,356
Sb [ppm]	18,000	12,879	16,452
Sc [ppm]	2,625	8,636	3,932
Sr [ppm]	3173,417	1079,818	1770,466
V [ppm]	7,458	57,970	22,534
Y [ppm]	6,021	13,697	9,014
Zn [ppm]	10,125	36,606	21,205
Zr [ppm]	55,896	52,515	30,562
	N = 24	N = 33	N = 73

Tab. 15: Mittlere Elementgehalte für die bei der Clusterzentrenanalayse berechneten 3 Cluster

Bohrung	Abkürzung	TK25
Alfeld Elze Z7	A-EZ-Z1	3824
Almstedt 1	ALMS-1	3925
Bahnsen-NW Z1	B-NW-Z1	3028
Benkeloh Z1	BNKL-Z1	2823
Berlin 3	BELN-3	3445
Bevern Z1	BEVR-Z1	2621
Bodenteich Z1	BDNT-Z1	3130
Bornkamp Z1	BRNK-Z1	2820
Braudel Z1	BRAU-Z1	3031
Brockzetel Z1	BRKZ-Z1	2511
Calvoerde 2/62	CAV-2/62	3633
Drawehn T1	DRAW-T1	2932
Ebstorf Z1	EBTF-Z1	3029
Eldagsen Z1	ELDG-Z1	3823
Elze-W Z1	EZ-W-Z1	3824
Feldberg 1/87	FEG-1/87	2646
Fuerstenau Z1	FRST-Z1	3411
Fürstenwalde 3	FSTW-3	3650
Ganderkesee Z1	GDKS-Z1	2917
Goldenstedt Z20	GOLD-Z20	3215
Gramzow 2/87	GZO-2/87	2750
Grevesmühlen 1/78	GV-1/78	2031
Hardesee T1	HRDS-T1	3528
Harsefeld Z1	HSFD-Z1	2622
Hemmelte Z4	HMLT-Z4	3213
Hemmendorf Z1	HMDF-Z1	3923
Hildesheimer Wald Z1	H-WD-Z1	3824
Hohenassel Z1	HASL-Z1	3826
Hoya Z2	HOYA-Z2	3221
Hude Z1	HUDE-Z1	2816

Bohrung	Abkürzung	TK25
Kaarssen 1/87	KAA-1/87	2732
Kassebruch T2	KABR-T2	2617
Krusenhausen Z1	KRSH-Z1	3223
Lemgow Z1	LEMG-Z1	3131
Luetje Hoern Z1	L-HO-Z1	2407
Mölln-Tief 1	MO-T-1	2329
Neerstedt Z1	NEER-Z1	3016
Norderney Z1	NONY-Z1	2209
Oberg T1	OERG-T1	3727
Oberg Z1	OERG-Z1	3727
Otternhagen Z1	OTTH-Z1	3423
Randzelgat Z1	RNZG-Z1	2407
Remels T1	REML-T1	2712
Remlingen 5	RMLG-5	3830
Remlingen 7	RMLG-7	3829
Sande Z1	SAND-Z1	2514
Schwerin 1/87	S-1/87	2333
Siedenburg Z7	SDBG-Z7	3319
Suderbruch T1	SDBR-T1	3323
Texas Z1	TXAS-Z1	3425
Uelzen Z1	UELZ-Z1	3029
Verden Z1	VERD-Z1	3120
Volkensen Z1	VOLK-Z1	2723
Volzendorf Z1	VZDF-Z1	3133
Westdorf 2a	WDRF-2A	2309
Wietzendorf Z3	WIDF-Z3	3126
Worth Z1	WORT-Z1	2922
Wriezen 3/88	WRIZ-3/88	3249
Wurzeldeich Z1	WZDH-Z1	2409
Zehdenick 2/75	ZEH-2/75	2945

Tab. 16: Bearbeitete Bohrungen

TAFELN

Die Tafeln 1 - 34 dokumentieren den Kern des Mittleren Muschelkalks der Bohrung Remlingen 7. Angegeben ist am Kopf der einzelnen Kernkisten lediglich die Bohrteufe. Angaben zur stratigraphischen Zuordnung finden sich auf der jeweils gegenüberliegenden Seite. Auf weitere Angaben wurde an dieser Stelle verzichtet, um dem späteren Betrachter ein möglichst unverfälschtes Bild der für das Norddeutsche Becken einzigartigen Kernstrecke zu geben. Angaben wie z. B. zur Lithologie, zur Mikrofazies, zu lithostratigraphischen Grenzen oder auch zu Probenpunkten sind in der detaillierten Kernaufnahme (Anl. 1 - 4) zu finden.

Tafel 1

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 575,76 m - 578,67 m,
Trochitenkalk-Formation, s. a. Anlage 1

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 578,67 m - 580,82 m,
Trochitenkalk-Formation, s. a. Anlage 1



Tafel 2

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 580,82 m - 583,79 m,
Trochitenkalk-Formation/Zyklus 9 (Diemel-Formation), Grenze bei 581,06 m,
s. a. Anlage 1

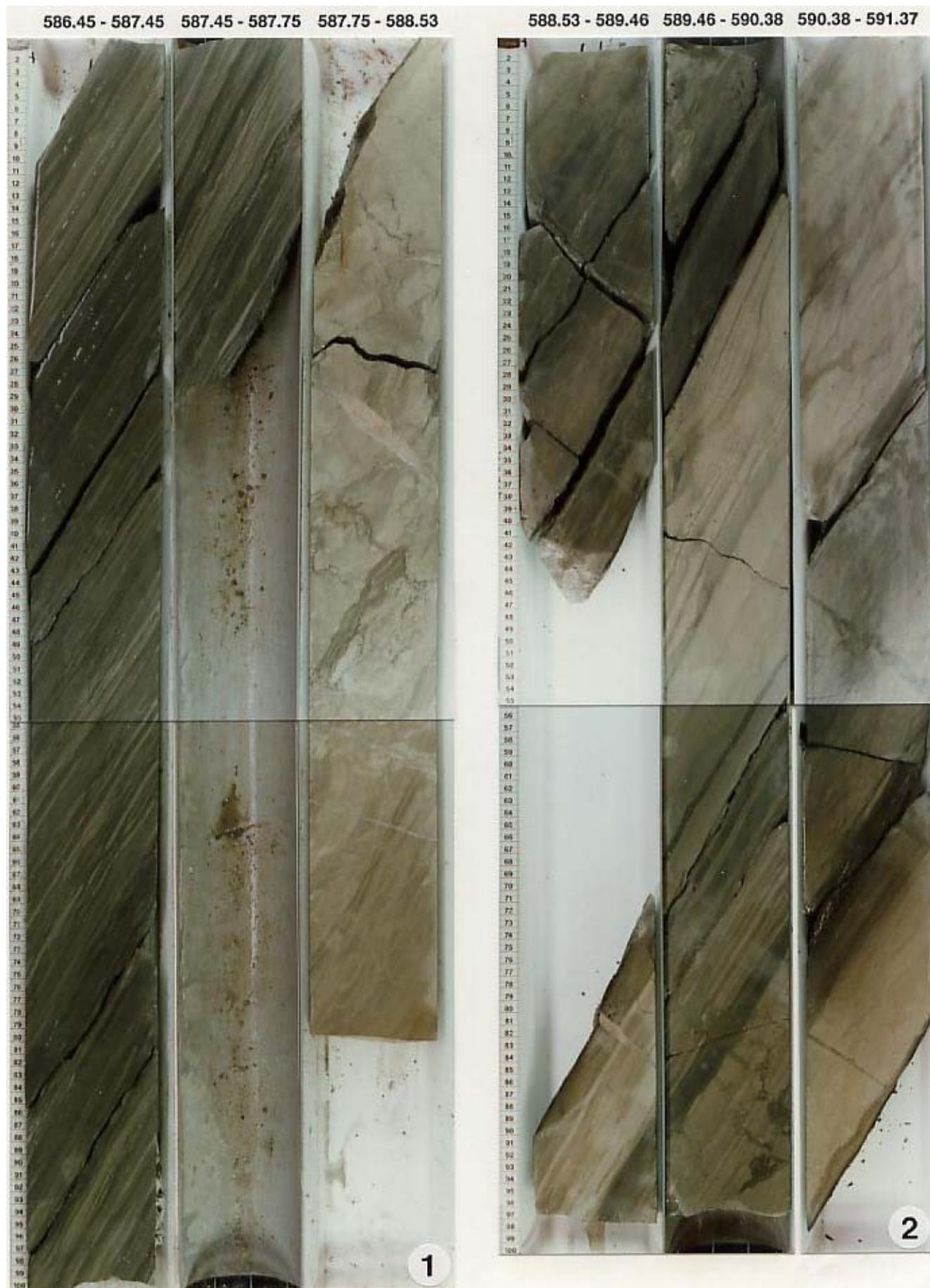
Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 583,79 m - 586,45 m,
Zyklus 9 (Diemel-Formation), s. a. Anlage 1



Tafel 3

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 586,45 m - 588,53 m,
Zyklus 9 (Diemel-Formation), s. a. Anlage 1

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 588,53 m - 591,37 m,
Zyklus 9 (Diemel-Formation), s. a. Anlage 1



Tafel 4

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 591,37 m - 594,31 m, Zyklus 9 (Diemel-Formation), s. a. Anlage 1

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 594,31 m - 596,64 m, Zyklus 9 (Diemel-Formation)/Zyklus 8 (Heilbronn-Formation), Grenze bei 596,15 m, s. a. Anlage 1



Tafel 5

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 596,64 m - 599,42 m,
Zyklus 8 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 1

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 599,42 m - 602,28 m,
Zyklus 8 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 1



Tafel 6

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 602,28 m - 605,00 m,
Zyklus 8 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 1

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 605,00 m - 607,93 m,
Zyklus 8 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 1



1

2

Tafel 7

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 607,93 m - 610,47 m,
Zyklus 8 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 1

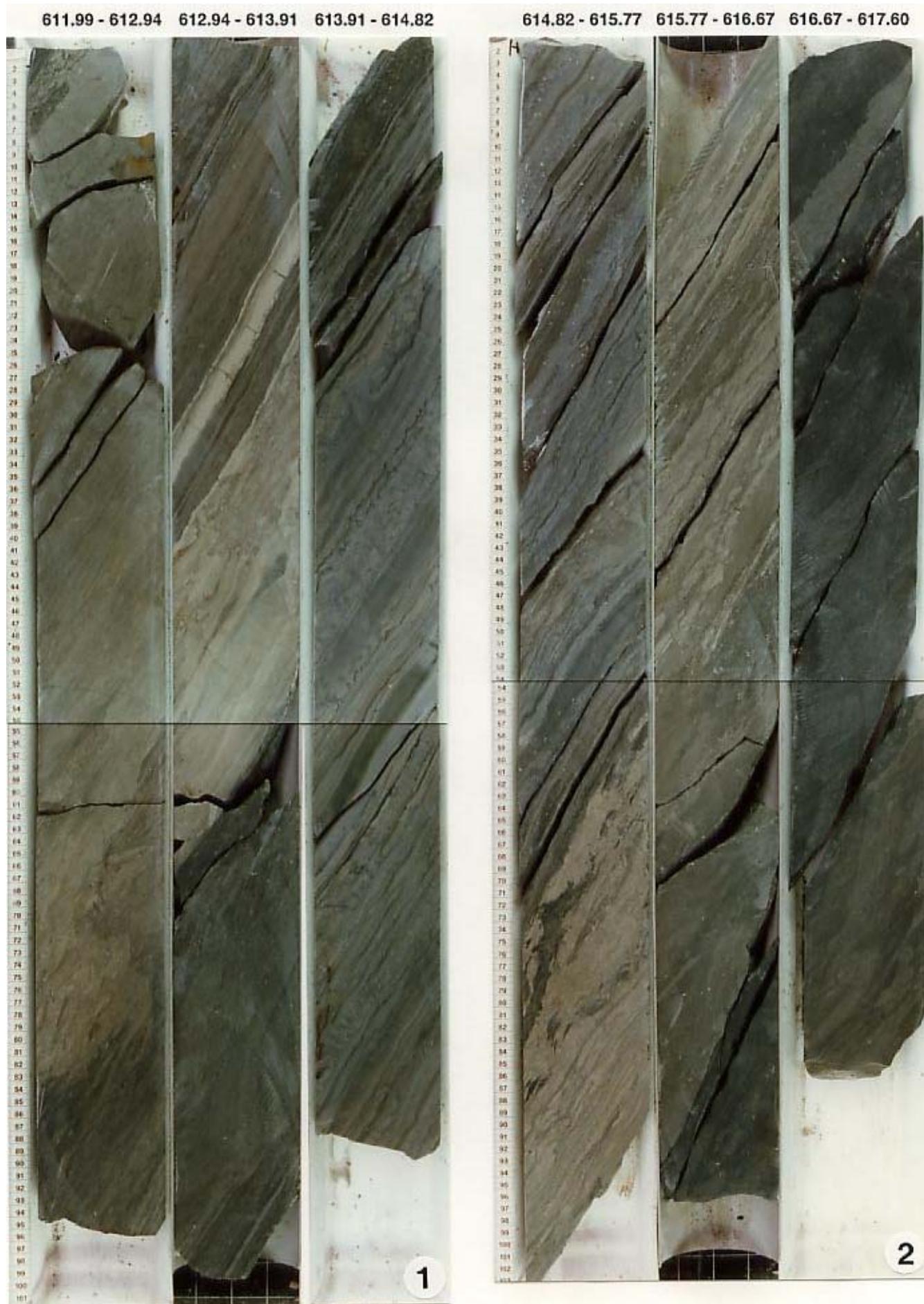
Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 610,47 m - 611,99 m,
Zyklus 8 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 1



Tafel 8

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 611,99 m - 614,82 m, Zyklus 8 (Heilbronn-Formation)/Zyklus 7 (Heilbronn-Formation), Grenze bei 612,86 m, s. a. Anlage 1

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 614,82 m - 617,60 m, Zyklus 7 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 1



Tafel 9

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 617,60 m - 619,50 m,
Zyklus 7 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 1

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 619,50 m - 622,33 m,
Zyklus 7 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 1



Tafel 10

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 622,33 m - 625,07 m,
Zyklus 7 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 1 und 2

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 625,07 m - 627,91 m,
Zyklus 7 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 2



Tafel 11

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 627,91 m - 630,39 m,
Zyklus 7 (Heilbronn-Formation)/Zyklus 6 (Heilbronn-Formation), Grenze bei
530,21 m, s. a. Anlage 2

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 630,36 m - 633,23 m,
Zyklus 6 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 2



Tafel 12

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 633,23 m - 635,78 m,
Zyklus 6 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 2

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 635,78 m - 638,49 m,
Zyklus 6 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 2



Tafel 13

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 638,49 m - 641,44 m, Zyklus 6 (Heilbronn-Formation)/Zyklus 5 (Heilbronn-Formation), Grenze bei 641,16 m, s. a. Anlage 2

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 641,44 m - 643,91 m, Zyklus 5 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 2



Tafel 14

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 643,91 m - 646,63 m,
Zyklus 5 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 2

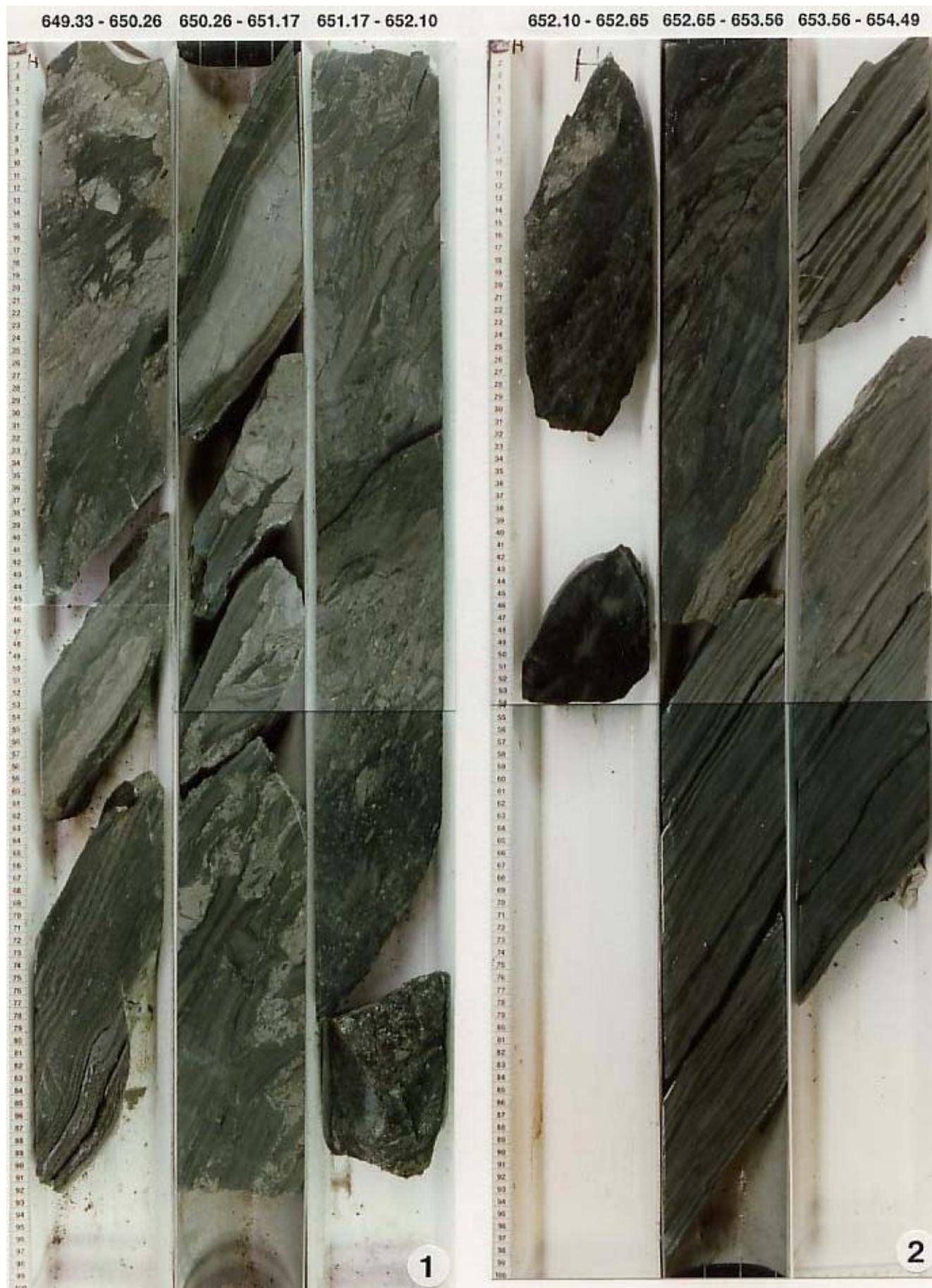
Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 646,63 m - 649,33 m,
Zyklus 5 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 2



Tafel 15

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 649,33 m - 652,10 m,
Zyklus 5 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 2

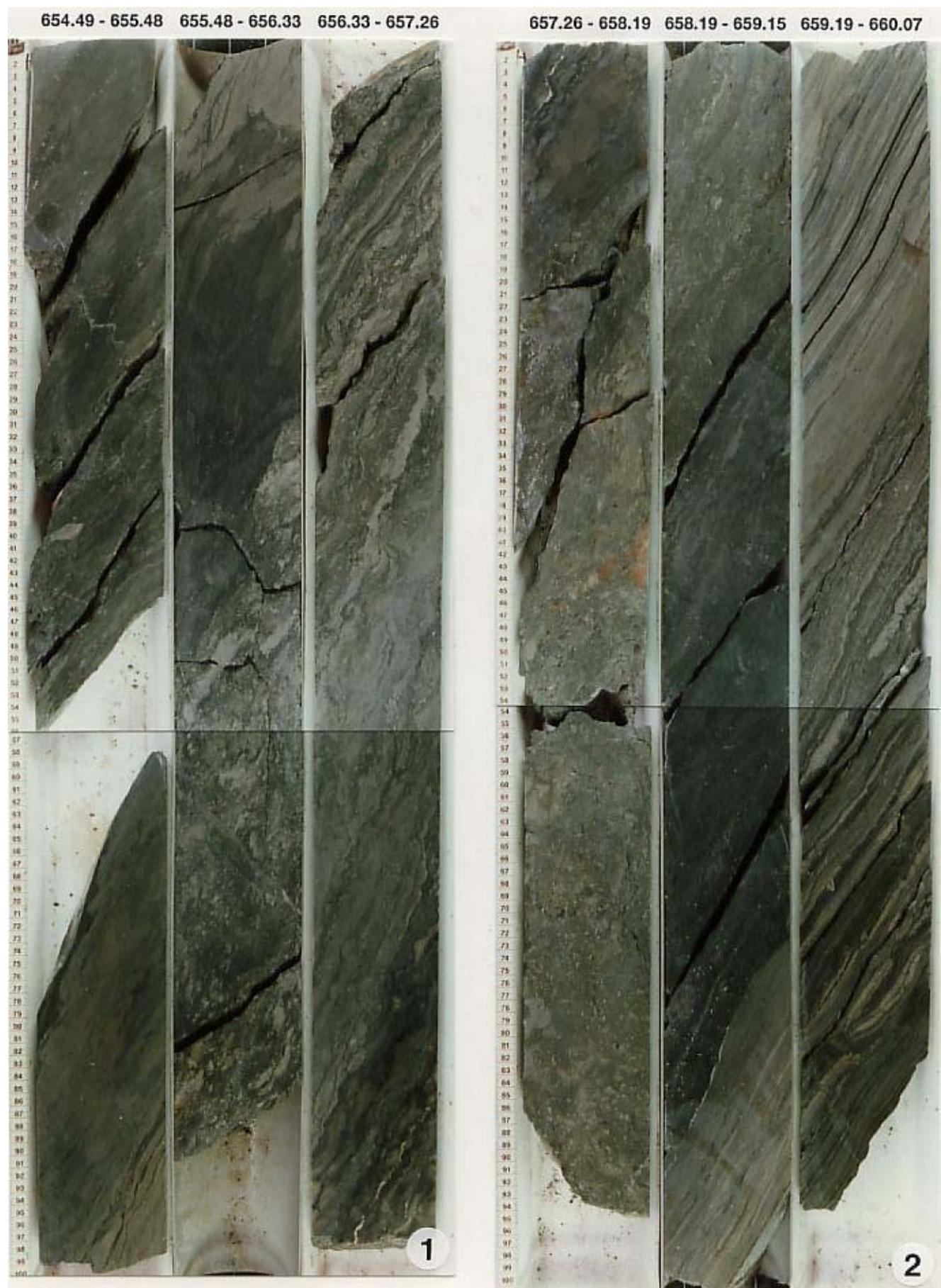
Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 652,10 m - 654,49 m,
Zyklus 5 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 2



Tafel 16

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 654,49 m - 657,26 m,
Zyklus 5 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 2

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 657,26 m - 660,07 m,
Zyklus 5 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 2



Tafel 17

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 660,07 m - 662,59 m,
Zyklus 5 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 2

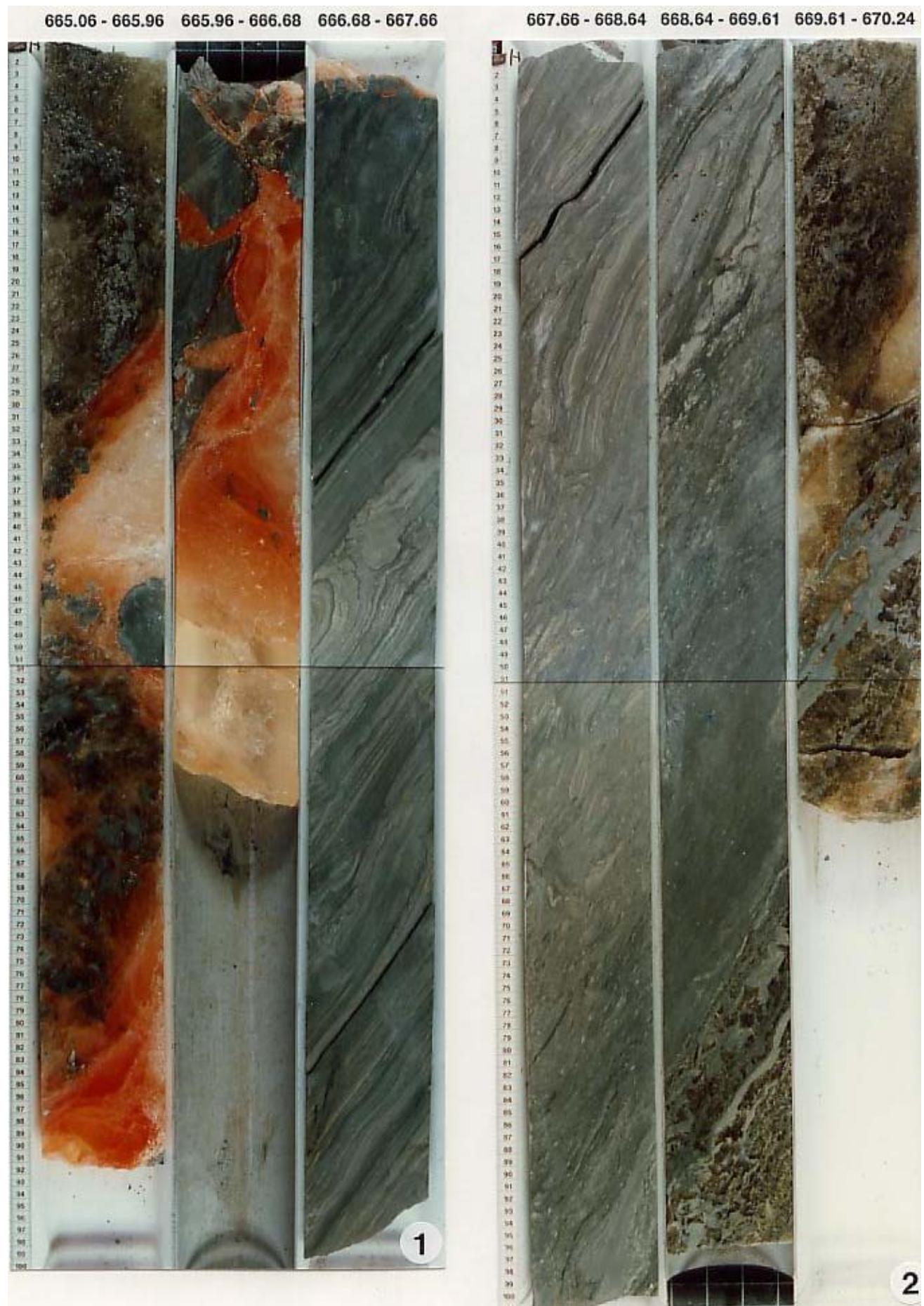
Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 652,59 m - 665,06 m,
Zyklus 5 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 2



Tafel 18

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 665,06 m - 667,66 m, Zyklus 5 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 2

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 667,66 m - 670,24 m, Zyklus 5 (Heilbronn-Formation)/Zyklus 4 (Heilbronn-Formation), Grenze bei 669,46 m, s. a. Anlage 2



Tafel 19

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 670,24 m - 673,17 m,
Zyklus 4 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 2 und 3

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 673,17 m - 676,10 m,
Zyklus 4 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 3



Tafel 20

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 676,10 m - 678,17 m,
Zyklus 4 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 3

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 678,18 m - 681,03 m,
Zyklus 4 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 3



Tafel 21

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 681,03 m - 683,91 m,
Zyklus 4 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 3

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 683,91 m - 686,78 m,
Zyklus 4 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 3

681.03 - 682.02 682.02 - 682.92 682.92 - 683.91



683.91 - 684.86 684.86 - 685.81 685.81 - 686.78



1

2

Tafel 22

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 686,78 m - 689,16 m,
Zyklus 4 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 3

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 689,16m - 691,91 m,
Zyklus 4 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 3

686.78 - 687.71 687.71 - 688.15 688.15 - 689.16



689.16 - 690.01 690.01 - 690.98 690.98 - 691.91



Tafel 23

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 691,91 m - 694,66 m,
Zyklus 4 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 3

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 694,66 m - 697,15 m,
Zyklus 4 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 3



Tafel 24

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 697,15 m - 699,85 m,
Zyklus 4 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 3

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 699,85 m - 702,66 m,
Zyklus 4 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 3



Tafel 25

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 702,66 m - 705,49 m, Zyklus 4 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 3

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 705,49 m - 708,04 m, Zyklus 4 (Heilbronn-Formation)/Zyklus 3 (Heilbronn-Formation), Grenze bei 705,73 m, s. a. Anlage 3



Tafel 26

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 708,04 m - 710,87 m,
Zyklus 3 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 3

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 710,87 m - 713,55 m,
Zyklus 3 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 3

708.04 - 708.94 708.94 - 709.92 709.92 - 710.87



710.87 - 711.84 711.84 - 712.60 712.60 - 713.55



1

2

Tafel 27

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 713,55 m - 716,07 m,
Zyklus 3 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 3

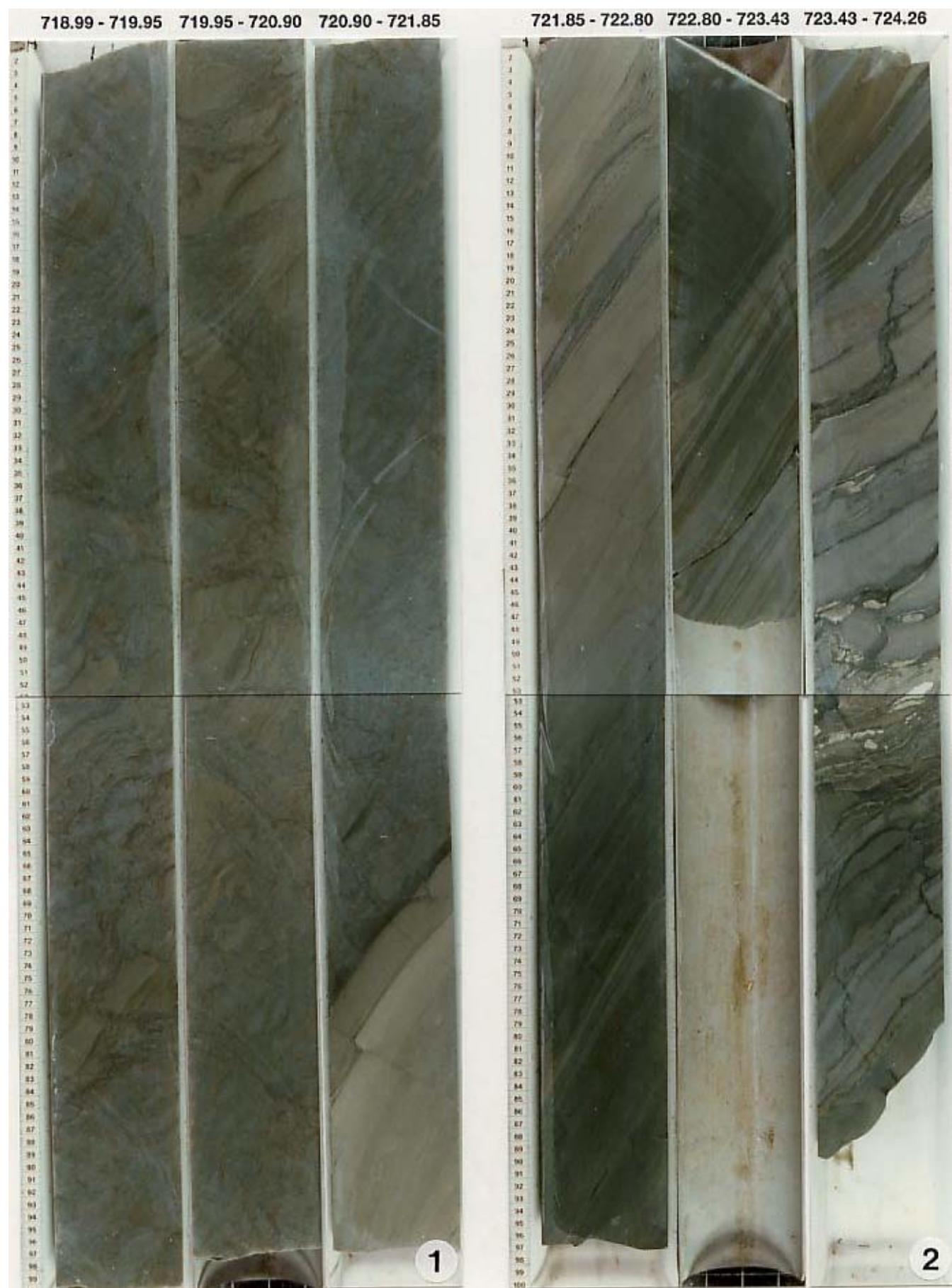
Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 716,07 m - 718,99 m,
Zyklus 3 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 3



Tafel 28

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 718,99 m - 721,85 m, Zyklus 3 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 4

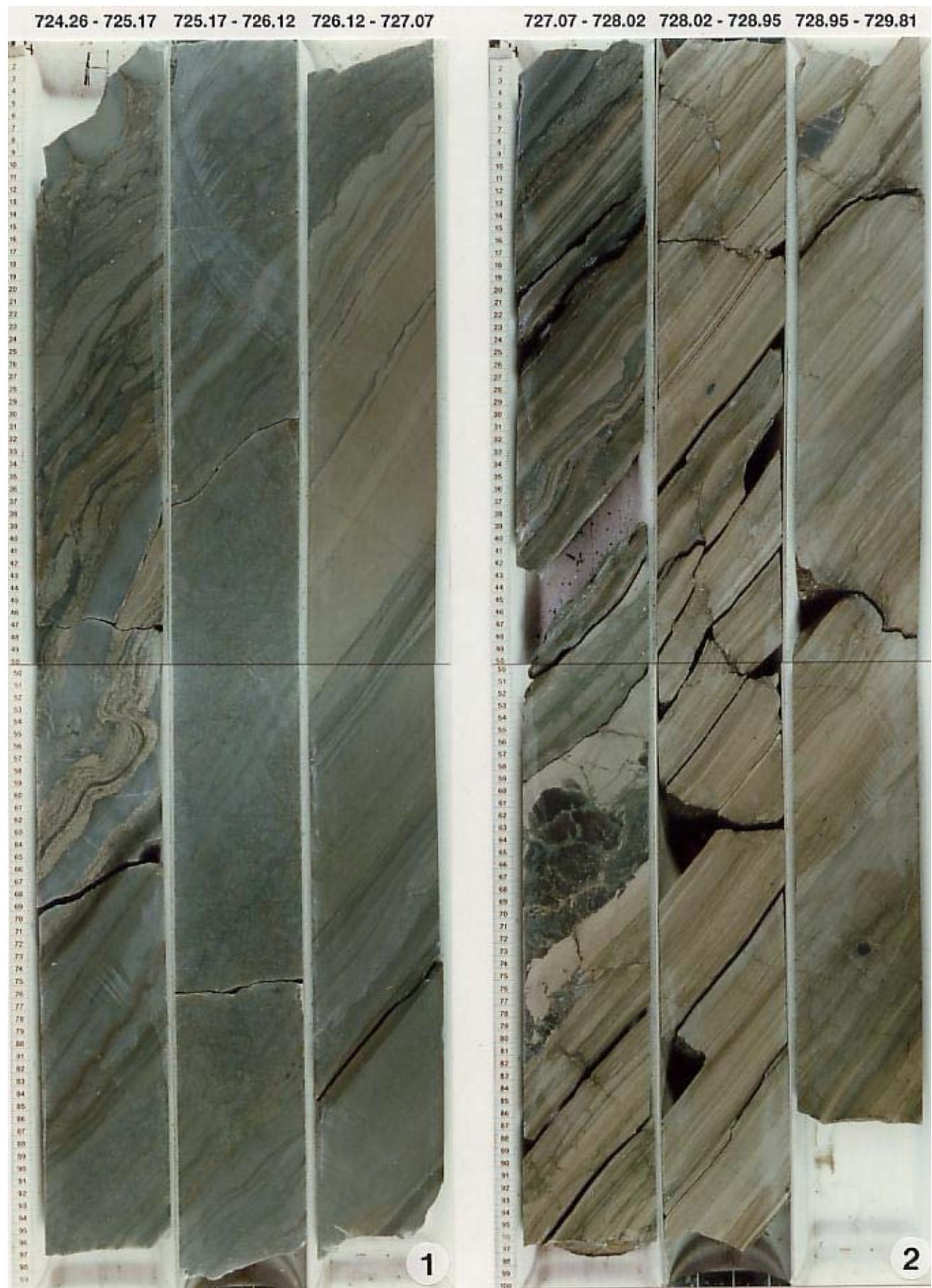
Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 721,85 m - 724,26 m, Zyklus 3 (Heilbronn-Formation)/Zyklus 2 (Heilbronn-Formation), Grenze bei 723,64 m, s. a. Anlage 4



Tafel 29

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 724,26 m - 727,07 m, Zyklus 2 (Heilbronn-Formation), s. a. Anlage 4

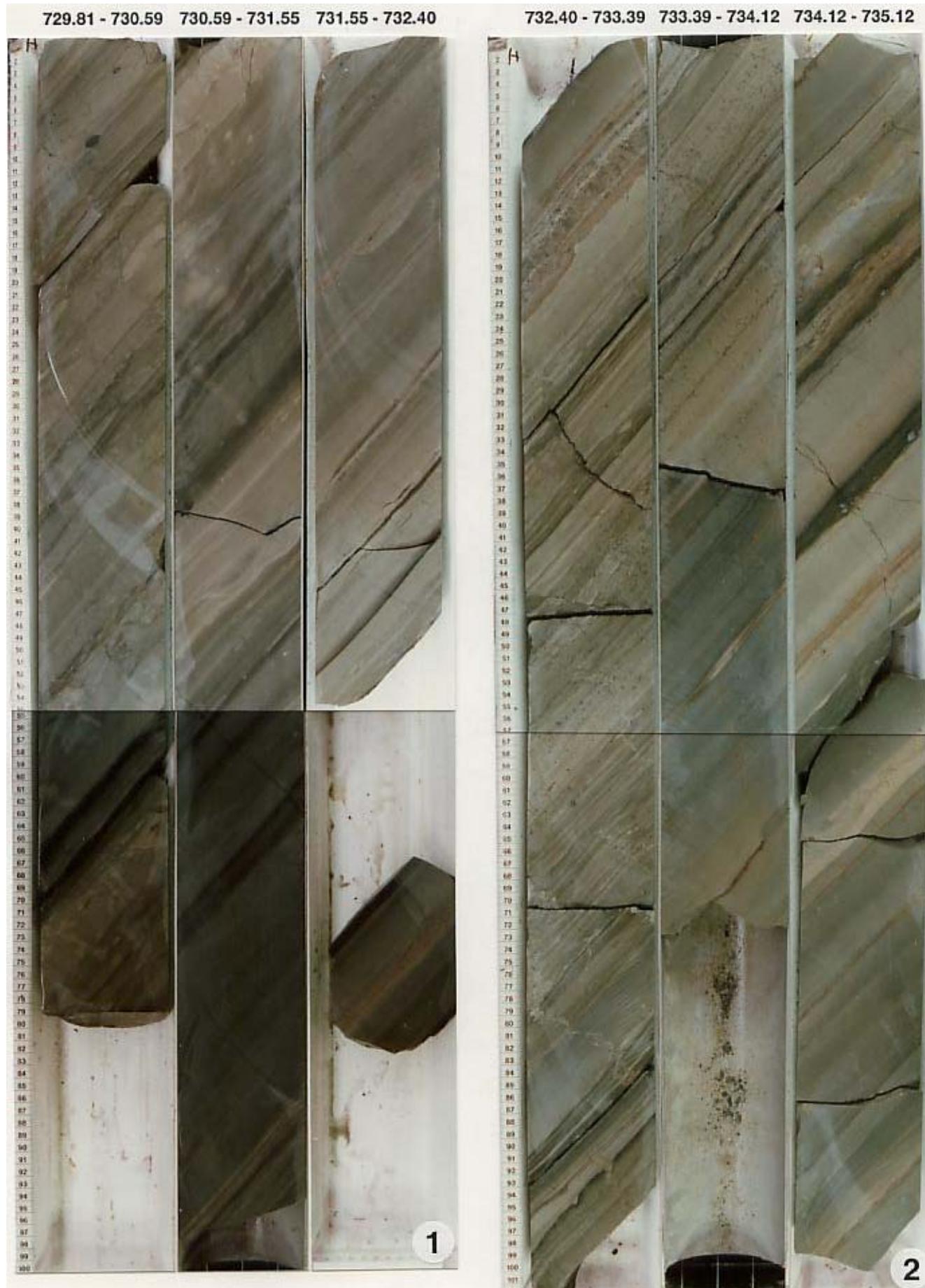
Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 727,07 m - 729,81 m, Zyklus 2 (Heilbronn-Formation)/Zyklus 1 (Karlstadt-Formation), Grenze bei 727,60 m, s. a. Anlage 4



Tafel 30

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 729,81 m - 732,40 m,
Zyklus 1 (Karlstadt-Formation), s. a. Anlage 4

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 732,40 m - 735,12 m
Zyklus 1 (Karlstadt-Formation), s. a. Anlage 4



Tafel 31

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 735,12 m - 738,00 m,
Zyklus 1 (Karlstadt-Formation), s. a. Anlage 4

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 738,00 m - 740,80 m,
Zyklus 1 (Karlstadt-Formation)/Jena-Formation, Grenze bei 738,77 m, s. a. Anlage 4



Tafel 32

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 740,80 m - 742,69 m,
Jena-Formation, s. a. Anlage 4

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 742,69 m - 745,55 m,
Jena-Formation, s. a. Anlage 4

740.80 - 741.23 741.40 - 742.08 742.08 - 742.69



742.69 - 743.61 743.61 - 744.58 744.58 - 745.55



Tafel 33

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 746,60 m - 749,33 m,
Jena-Formation, s. a. Anlage 4

Fig. 2: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 749,33 m - 751,72 m,
Jena-Formation, s. a. Anlage 4



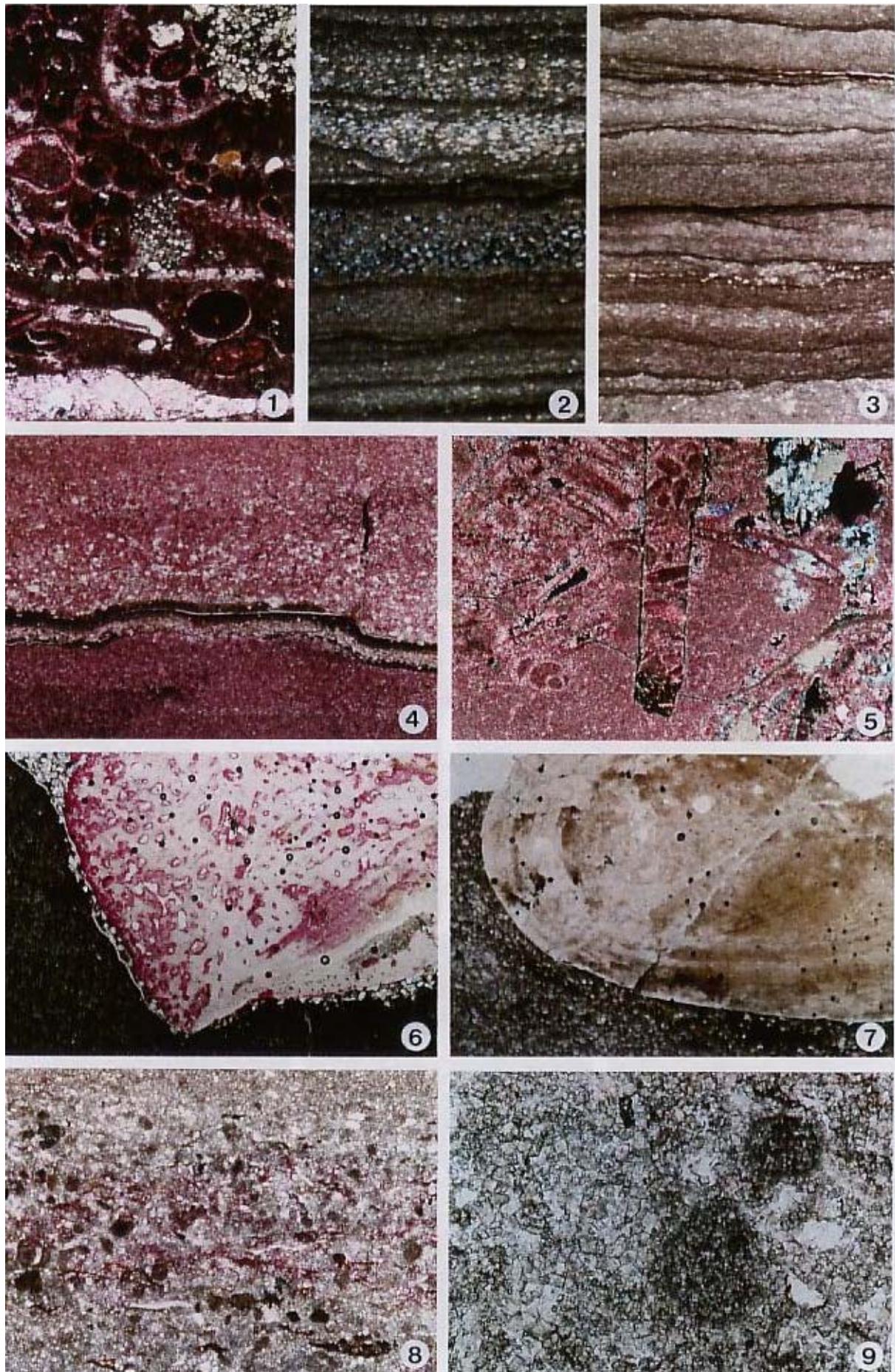
Tafel 34

Fig. 1: Bohrung Remlingen 7 - Kernfotografie des Intervalls von 751,72 m - 754,16 m,
Jena-Formation, s. a. Anlage 4



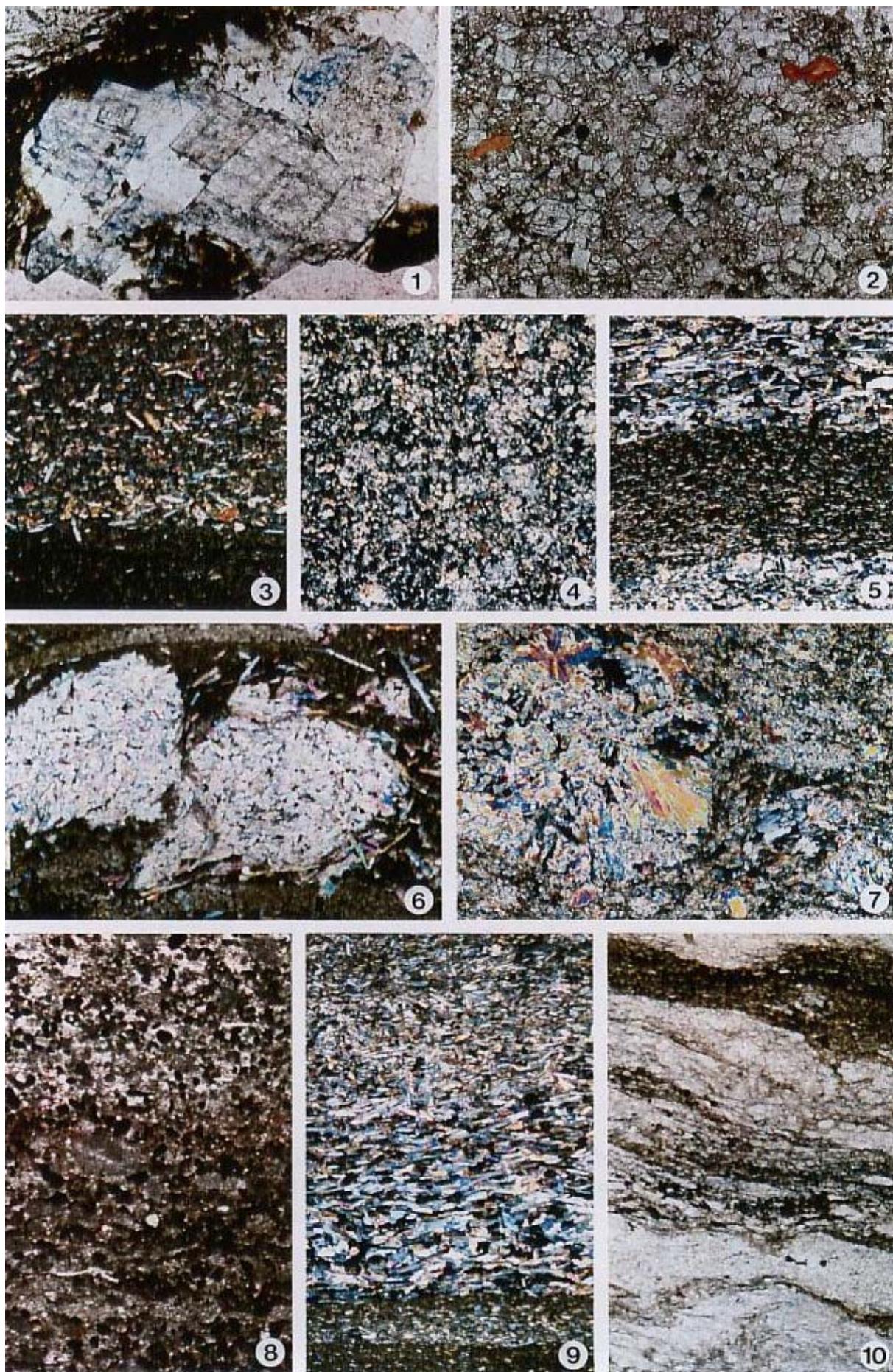
Tafel 35: Calcit- und Dolomit-Fazies im Muschelkalk der Bohrung Remlingen 7

- Fig. 1: Oobiomikrit (Wackstone) mit spätdiagenetisch gebildetem Eisencalcit (Blockzement) und partieller Verdrängung der mikritischen Matrix und der biogenen Komponenten durch Dolomit. Trochitenkalk-Formation, 580,28 m, 25-fache Vergrößerung
- Fig. 2: Algenlaminit - Dolosilttitlaminit, eben bis feinwellig, feinlaminierter Dolomikrit mit bituminösen Laminae und gradierter Quarzsiltlage. Einzel Dolomikrit-Schichten anhydritisch zementiert. Zyklus 5 (Heilbronn-Formation), 667,84 m, 25-fache Vergrößerung, +Nicol's
- Fig. 3: Algenlaminit. Feinlaminierter Dolomikrit mit ebenen bis schwach welligen, bituminösen Laminae, die auf eine wechselseitige Beziehung zwischen skelettfreien Algen/Bakterien-Assoziationen und Sedimentation zurückgeführt werden. Zyklus 8 (Heilbronn-Formation), 606,42 m 25-fache Vergrößerung
- Fig. 4: Calcisilttitlaminit, lagige Anreicherung von detritischen Quarzkörnern in mikritischer Calcit-Matrix. Jena-Formation, 748,55 m, 50-fache Vergrößerung
- Fig. 5: Oobiomikrit (Wackstone) mit einem stratiformen Stylolith. Biogenkomponenten weisen durch Drucklösung Anlösungserscheinungen auf. Stylolithensaum enthält angelöste Karbonatfragmente und Quarzkörper. Dolomitrhomboeder in der Matrix belegen eine spätdiagenetische Dolomitisierung. Trochitenkalk-Formation, 579,51 m, 25-fache Vergrößerung, +Nicol's
- Fig. 6: Dolosilttitlaminit mit Knochenrest an der Basis einer Quarzsiltlage, Knochenrest zeigt eine typisch spongiosa Ausbildung mit randlich calcitischer Kruste. Stärker spongios im Zentrum, z. T. anhydritisch. Zyklus 1 (Karlstadt-Formation), 732,67 m, 25-fache Vergrößerung
- Fig. 7: Dolomikrosparit (Mudstone) mit phosphatischem Knochenrest eines Pachypleurosauriers. Querschnitt zeigt eine typische konzentrische Struktur. Jena-Formation, 738,81 m, 25-fache Vergrößerung
- Fig. 8: Dolomikrosparit mit Peloidlage und Glimmeranreicherungen. Zyklus 9 (Diemel-Formation), 583,00 m, 50-fache Vergrößerung
- Fig. 9: Dolosparit, vollständige spätdiagenetische Dolomitisierung der ehemals mikritischen Grundmasse, einzelne Biogenstrukturen noch erkennbar. Jena-Formation, 744,26 m, 100-fache Vergrößerung



Tafel 36: Dolomit- und Anhydrit-Fazies im Mittleren Muschelkalk der Bohrung Remlingen 7

- Fig. 1: Spätdiagenetisch gebildete Dolomitrhomboeder mit einem wolkigen Kern und einem klaren Saum zeigen einen deutlichen Zonarbau. Zyklus 5 (Heilbronn-Formation), 659,92 m, 100-fache Vergrößerung
- Fig. 2: Dolosparit mit Phosphatresten. Mikritische Grundmasse ist fast vollständig spätdiagenetisch dolomitisiert. Trochitenkalk-Formation, 580,02 m, 200-fache Vergrößerung
- Fig. 3: Lagige Anreicherung von Anhydriteisten in dolomikritischer Matrix. Anhydriteisten wirr eingeregelt und schwach gradiert. Schwarze Lage wird als Hinweis auf gelöste Gipskruste gesehen. Zyklus 3 (Heilbronn-Formation), 722,75 m, 50-fache Vergrößerung, + Nicols
- Fig. 4: Feinkristalliner Anhydrit mit isometrisch-granularer Struktur. Zyklus 7 (Heilbronn-Formation), 617,18 m, 25-fache Vergrößerung, + Nicols
- Fig. 5: Anhydrit-Laminit. Wechsellagerung von Anhydritlagen mit leistenförmig-tafliger Struktur und einer durch mikritischen Dolomit verunreinigten Anhydritlage mit leistenförmig-tafliger bis isometrisch-granulären Struktur. Zyklus 2 (Heilbronn-Formation), 727,22 m, 25-fache Vergrößerung, + Nicols
- Fig. 6: Dolomikrit mit diagenetisch gebildeten Anhydritknollen und einzelnen Anhydriteisten. Zyklus 1 (Karlstadt-Formation), 736,12 m, 50-fache Vergrößerung, + Nicols
- Fig. 7: Massiver, knolliger Anhydrit. Anhydritknoten bilden sich diagenetisch in einem feinkörnig, isometrisch-granularem Anhydrit. Zyklus 8 (Heilbronn-Formation), 599,64 m, 100-fache Vergrößerung, + Nicols
- Fig. 8: Dolobiopelmikrit (Wackstone) mit dicht gepackten Komponenten. Zyklus 9 (Diemel-Formation), 583,00 m, 25-fache Vergrößerung
- Fig. 9: Gradierte Anhydritlage mit scharf ausgebildeter Basis, lagig eingeregelten Anhydriteisten unten und wirr eingeregelten Anhydriteisten oben. Anhydriteisten nehmen in ihrer Dichte und Größe nach oben zu ab. Zyklus 3 (Heilbronn-Formation), 722,75 m, 25-fache Vergrößerung, + Nicols
- Fig. 10: Anhydritlaminit mit diagenetisch gebildeten Anhydrit-Knollen. Zyklus 7 (Heilbronn-Formation), 623,36 m, 25-fache Vergrößerung



ERKLÄRUNG

Hiermit versichere ich, daß ich die Dissertation selbst und ohne fremde Hilfe verfaßt, andere als die von mir benannten Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

LEBENSLAUF

Persönliche Daten

Name: Simone Manuela Röhling, geb. Brückner
Geburtsdatum und -ort: 05.01.1964 in Potsdam
Familienstand: verheiratet, 1 Kind

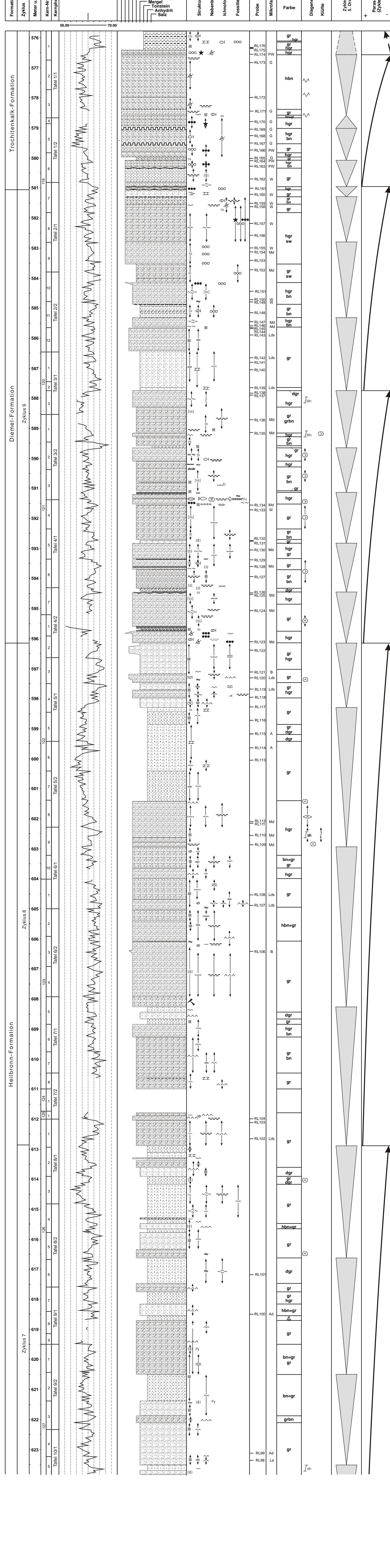
Ausbildung

1970 - 1978	Besuch der 10. Oberschule, Berlin-Mahlsdorf
1978 - 1982	Besuch der Erweiterten Oberschule „Immanuel Kant“, Berlin-Lichtenberg
Juli 1982	Abitur
September 1983 - August 1988	Studium der Geologie an der Ernst-Moritz-Arndt Universität Greifswald, Sektion Geologische Wissenschaften
Mai 1987	Diplom-Geologen-Hauptprüfungen
Juli 1988	Verteidigung der Diplomarbeit
September 1988 - Februar 1991	Forschungsstipendium an der Ernst-Moritz-Arndt Universität Greifswald, Fachbereich Geologie

Anstellungen / Berufserfahrung

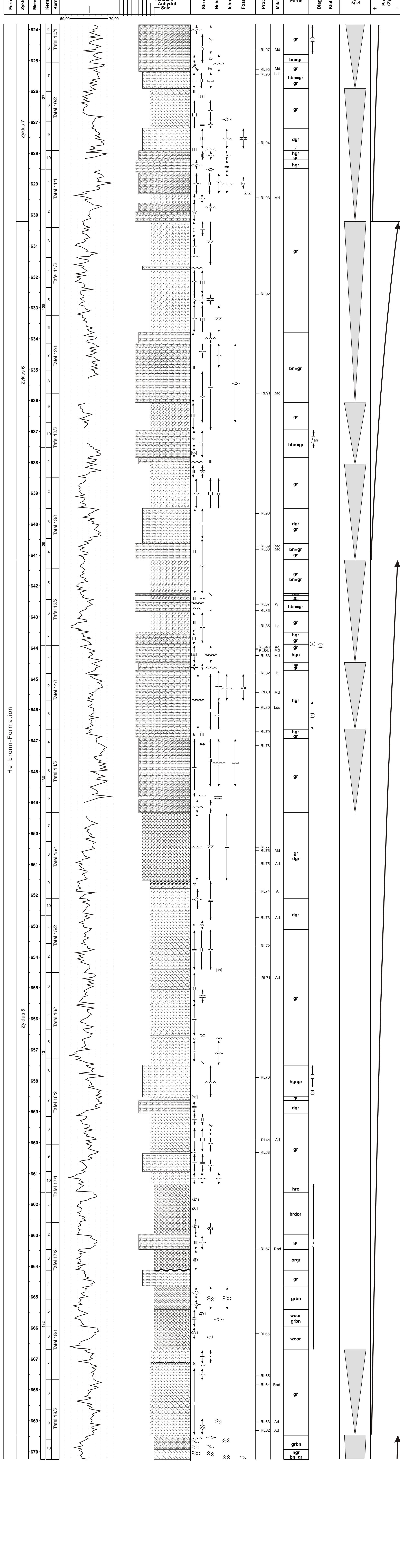
September 1982 - August 1983	Geologisches Praktikum am Zentralen Geologischen Institut Berlin
Mai bis Juli 1987	Praktikum im VEB Geologische Forschung und Erkundung, Betriebsteil Jena
März 1991 - September 1994	Wissenschaftliche Angestellte an der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
November 1995 - Oktober 1997	Wissenschaftliche Angestellte an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geologische Wissenschaften und Geiseltalmuseum
April 1998 -	Wissenschaftliche Angestellte an der Universität Karlsruhe, Geophysikalisches Institut

JR



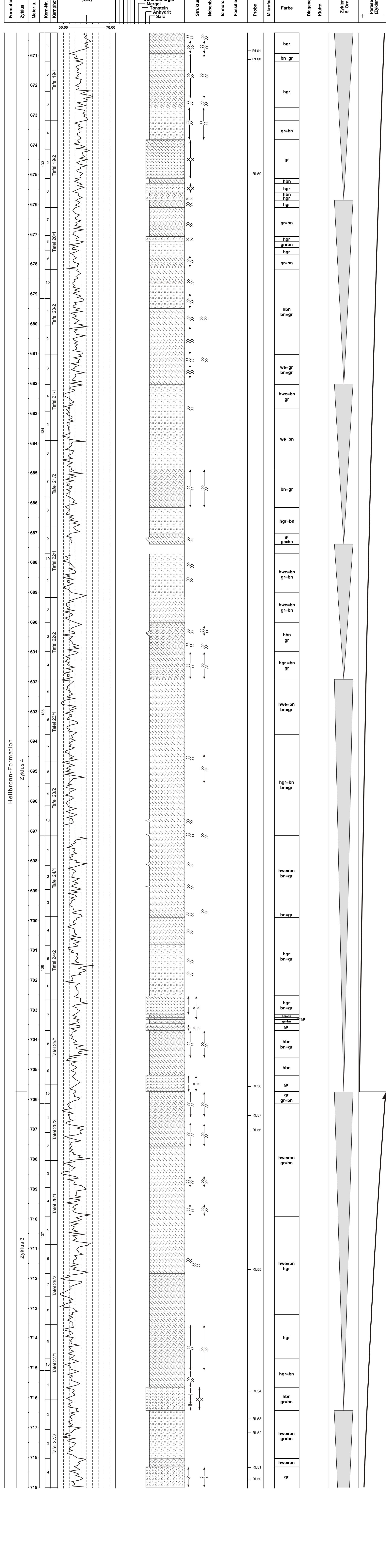
Lithologisches Profil der Bohrung Remlingen 7

Profilmeter 623.84 - 670.24



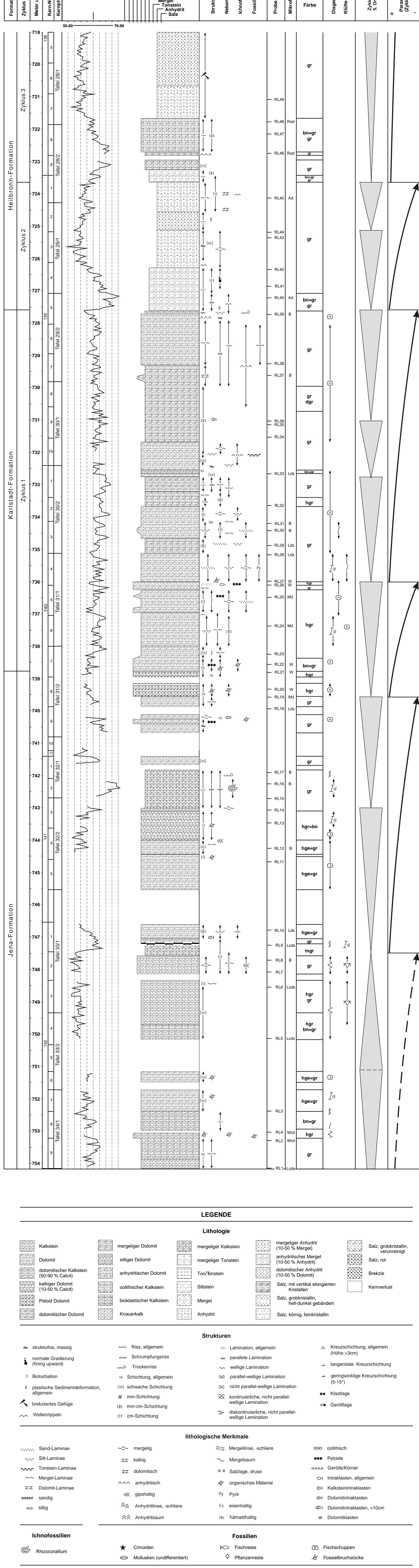
100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000

JR



Lithologisches Profil der Bohrung Remlingen 7

Profilmeter 718.99 - 754.16



LEGENDE

Lithologie

Kalkstein	mergeliger Dolomit	mergeliger Kalkstein	mergeliger Anhydrit	Salz, grobkristallin, verunreinigt
Dolomit	siltiger Dolomit	mergeliger Tonstein	anhydritischer Mergel	Salz, rot
dolomitischer Kalkstein (50-90 % Calcit)	anhydritischer Dolomit	Ton/Tonstein	dolomitischer Mergel (10-50 % Anhydrit)	Brekzie
kalkiger Dolomit (10-50 % Calcit)	oolithischer Kalkstein	Siltstein	anhydritischer Anhydrit (10-50 % Dolomit)	Kernverlust
Peloid Dolomit	bioklastischer Kalkstein	Mergel	Salz, mit vertikal elongierten Kristallen	
dolomitischer Dolomit	Knauerkalk	Anhydrit	Salz, grobkristallin, hell-dunkel gebändert	

Strukturen

struktuless, massig	Riss, allgemein	Lamination, allgemein	Kreuzschichtung, allgemein (Höhe >3cm)
normale Gradierung (fining upward)	Schrumpfungsriss	parallel Lamination	tangentielle Kreuzschichtung
Bioturbation	Trockenriss	wellige Lamination	geringwinklige Kreuzschichtung (5-15°)
plastische Sedimentdeformation, allgemein	ss Schichtung, allgemein	parallel-wellige Lamination	Klastlage
brekziertes Gefüge	mm-Schichtung	nicht parallel-wellige Lamination	Gerölllage
Wellenrippeln	mm-cm-Schichtung	kontinuierliche, nicht parallel-wellige Lamination	
	cm-Schichtung	diskontinuierliche, nicht parallel-wellige Lamination	

lithologische Merkmale

Sand-Laminae	mergelig	Mergellinse, -schliere	oolithisch
Silt-Laminae	kalkig	Mergelsaum	Peloids
Tonstein-Laminae	dolomitisch	Salzlage, druse	Gerölle/Körner
Mergel-Laminae	anhydritisch	organisches Material	Intraklasten, allgemein
Dolomit-Laminae	gipshaltig	Pyrit	Dolomitinkratlasten
sandig	Anhydritlinse, -schliere	eisenhaltig	Dolomitinkratlasten, >10cm
siltig	Anhydritsaum	He	Dolomitklasten

Ichnofossilien

Rhizocorallium

★ Crinoiden

○ Fischreste

□ Pflanzenreste

□ Kluff, mineralisiert (Gips)

Fossilien

○ Rhizocorallium

○ Fischreste

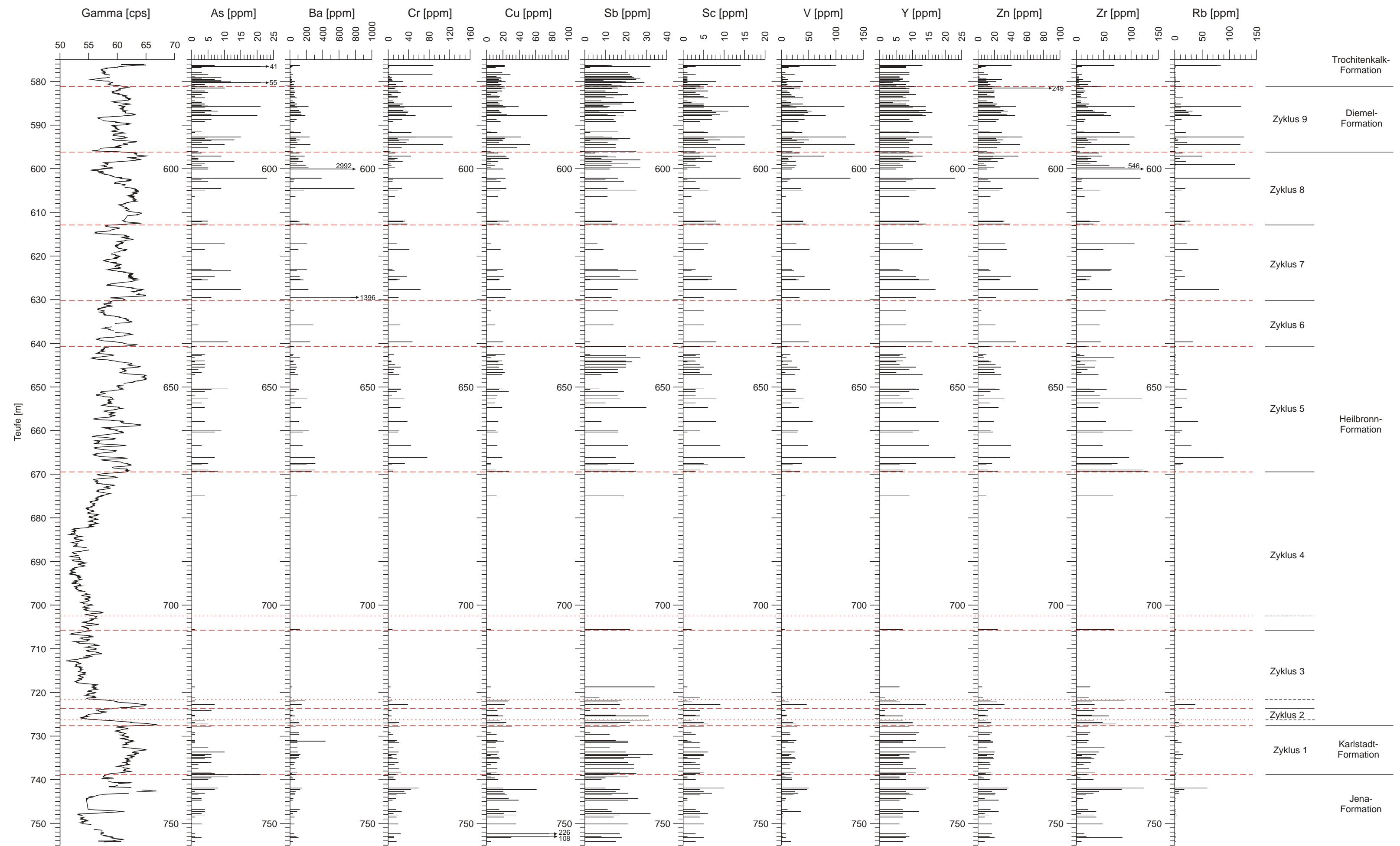
○ Pflanzenreste

○ Kluff, mineralisiert (Mangan)
</tbl_header


Anlage 5

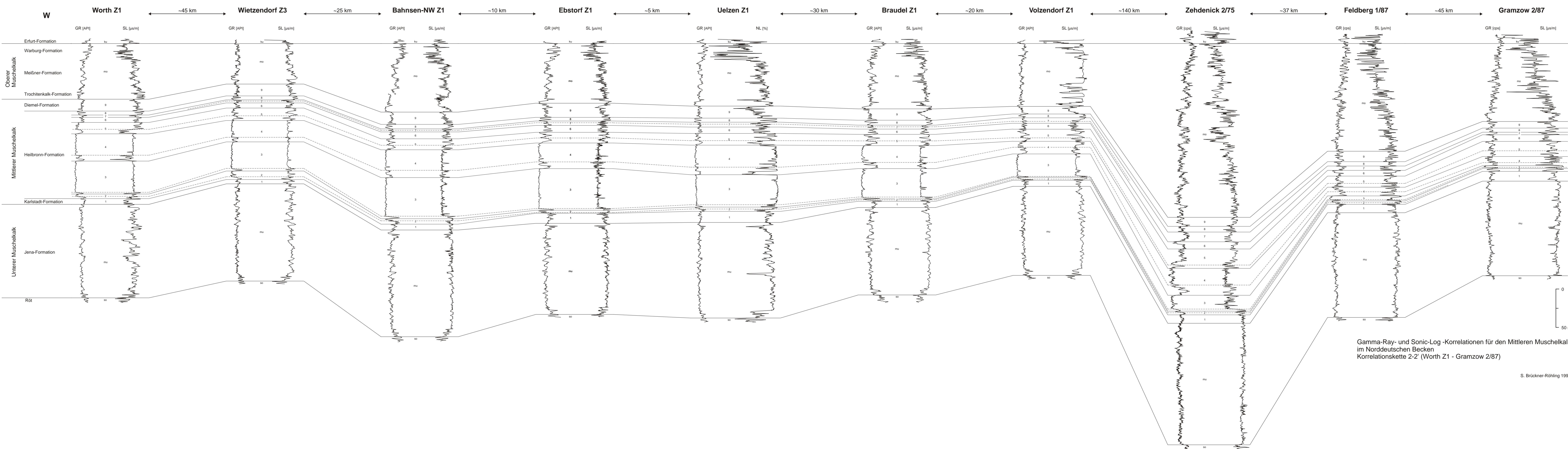


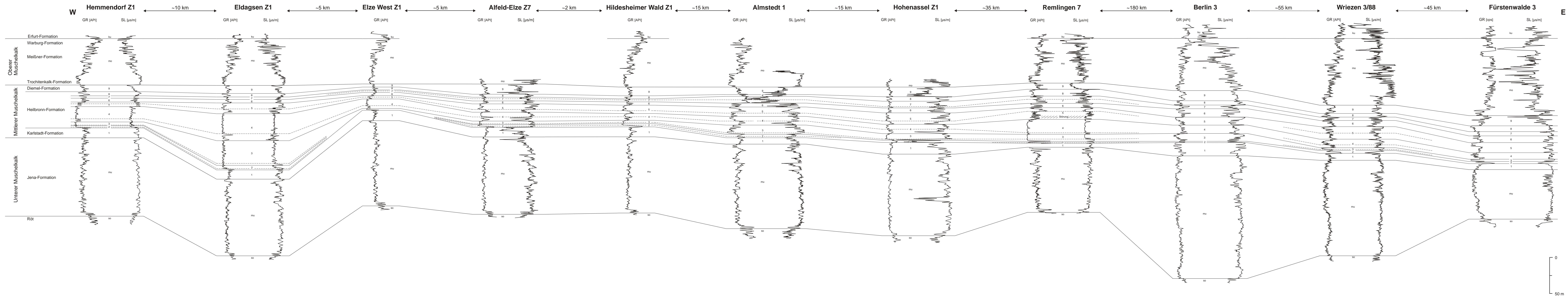
Gehalte der Elemente Si, Ca, Mg, Al, SO₃, Fe, K, Sr, Mn, Na im Mittleren Muschelkalk der Bohrung Remlingen 7



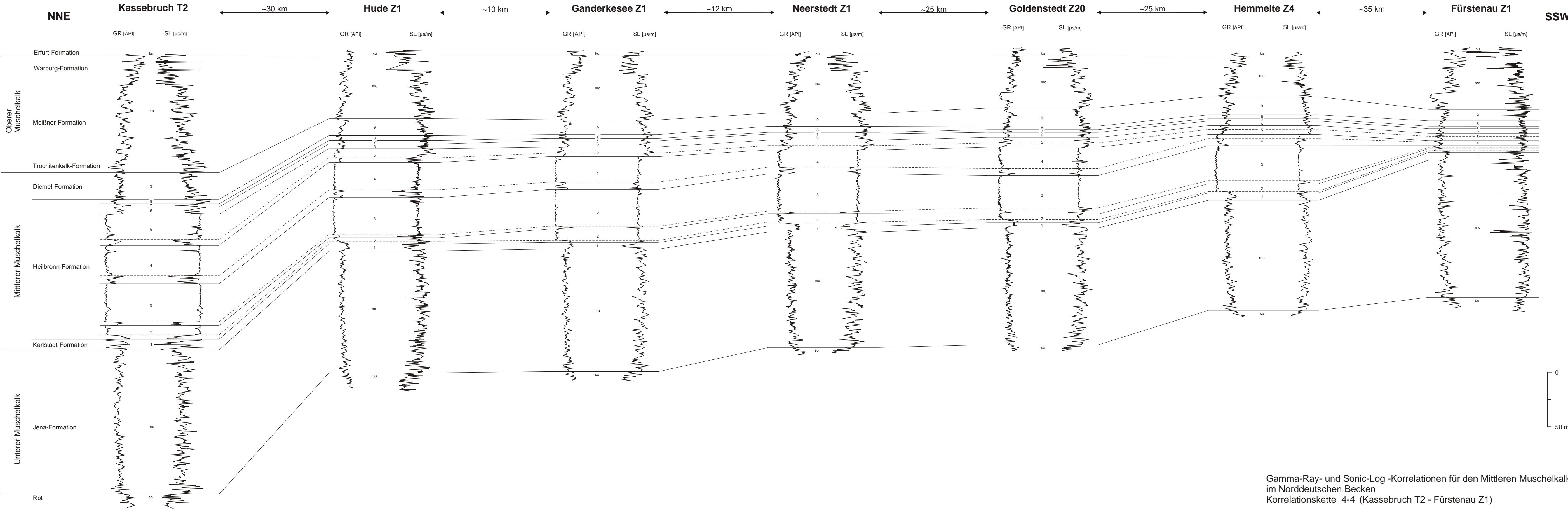
Gehalte der Elemente As, Ba, Cr, Sb, Sc, V, Y, Zn, Zr, Rb im Mittleren Muschelkalk der Bohrung Remlingen 7



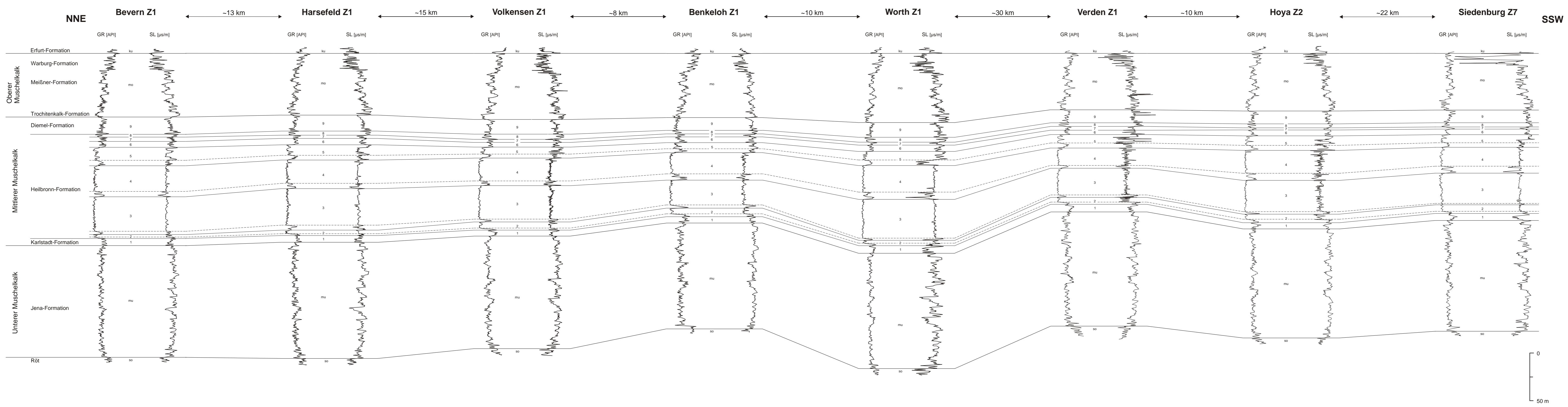




Gamma-Ray- und Sonic-Log -Korrelationen für den Mittleren Muschelkalk
im Norddeutschen Becken
Korrelationskette 3-3' (Hemmendorf Z1 - Fürstenwalde 3)



Gamma-Ray- und Sonic-Log -Korrelationen für den Mittleren Muschelkalk im Norddeutschen Becken Korrelationskette 4-4' (Kassebruch T2 - Fürstenau Z1)



Gamma-Ray- und Sonic-Log -Korrelationen für den Mittleren Muschelkalk
im Norddeutschen Becken
Korrelationskette 5-5' (Bevern Z1 - Siedenburg Z7)

