

SDGG

Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften

2020. Heft 91 / 1

Stratigraphie von Deutschland XIII

Muschelkalk

Teil 1



Schriftenreihe der
Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften
Heft 91

Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.)

Stratigraphie von Deutschland XIII
Muschelkalk

Teil 1

Koordination: Hans Hagdorn

Redaktion: Hans Hagdorn & Theo Simon
für die Subkommission Perm-Trias



Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, 2020

Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften SDGG
Herausgeber: Deutsche Geologische Gesellschaft – Geologische Vereinigung DGGV
Schriftleitung: Heinz-Gerd Röhling
Redaktion Heft 91: Hans Hagdorn & Theo Simon
ISSN 1860-1782

Heft 91: Stratigraphie von Deutschland XIII. Muschelkalk

Titelbild: Oberer Muschelkalk im aufgelassenen Steinbruch Künzelsau-Garnberg und *Ceratites (Opheoc.) compressus* aus diesem Aufschluss (Original im Muschelkalkmuseum Hagdorn Stadt Ingelfingen).
Fotos und Bildmontage H. Hagdorn

ISBN 978-3-510-49243-5
ISBN ebook (pdf) 978-3-510-49246-6
Information on this title: www.schweizerbart.de/9783510492435

© Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften – Geologische Vereinigung, Berlin 2020

Das Werk einschließlich aller Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Vertrieb/Distributor:
E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
(Nägele und Obermiller)
Johannesstr. 3 A
70176 Stuttgart, Germany
order@schweizerbart.de
<http://www.schweizerbart.de>

Layout:
DesignRing Designmanagement GmbH, D-06114 Halle

Druck:
Mecke Druck und Verlag, D-37115 Duderstadt

Inhaltsverzeichnis

Teil 1

Vorwort	
Hans Hagdorn, Theo Simon	13
Widmung	
Hans Hagdorn, Theo Simon	14
Georg Christian Füchsel (1722–1773) – Pionier der Stratigraphie	
Siegfried Rein (†)	15
Grundlagen und Methodik der stratigraphischen Beschreibung der Muschelkalk-Gruppe in Deutschland	
Hans Hagdorn, Theo Simon	21
1. Der Muschelkalk in Raum und Zeit	
1.1 Heutige Verbreitung des Muschelkalks und Abgrenzung der Bearbeitungsgebiete	
Hans Hagdorn, Walter Freudenberger, Heinz-Gerd Röhling, Simone Röhling, Theo Simon	33
1.2 Paläogeographie und Klima des Mitteleuropäischen Beckens zur Zeit des Muschelkalks (Anisium, Ladinium)	
Heinz-Gerd Röhling, Hans Hagdorn, Edgar Nitsch, Josef Paul, Simone Röhling, Matthias Franz ...	41
1.3 Geochronologie des Muschelkalks	
Manfred Menning	63
1.4 Paläobiogeographie des Mitteleuropäischen Beckens in der Frühen und Mittleren Trias und Faunenimmigration ins Muschelkalkmeer	
Hans Hagdorn	111
2. Forschungsgeschichte	
2.1 Geschichtliche Entwicklung der Muschelkalkstratigraphie	
Hans Hagdorn	124
2.2 Die Erforschung der Muschelkalk-Lebewelt	
Hans Hagdorn	144
2.3 Die Korrelierung des Muschelkalks mit der tethyalen Trias	
Hans Hagdorn	153
3. Fauna und Flora	
3.1 Fauna und Flora des Muschelkalks – ein Forschungsbericht	
Hans Hagdorn	159
3.2 Fossile Lebensgemeinschaften des Muschelkalks	
Hans Hagdorn	193
3.3 Ichnofauna des Muschelkalks	
Dirk Knaust, Hans Hagdorn	215
3.4 Tetrapodenfährten des Muschelkalks	
Hendrik Klein	226
4. Biostratigraphie	
4.1 Biostratigraphische Zonierung des Muschelkalks	
Hans Hagdorn	236
4.2 Biostratigraphie der Muschelkalk-Cephalopoden	
Hans Hagdorn	246
4.3 Biostratigraphie und Zonierung der Conodonten des Muschelkalks	
Annette E. Götz, Friedrich-Wilhelm Luppold, Hans Hagdorn	274

4.4	Biostratigraphie der Echinodermen des Muschelkalks Hans Hagdorn, Mike Reich	287
4.5	Biostratigraphie der Ostrakoden und Conchostraken des Muschelkalks Hans Hagdorn, Frank Scholze	293
4.6	Biostratigraphisches Potenzial von Bivalven und Gastropoden des Muschelkalks Hans Hagdorn	298
4.7	Biostratigraphisches Potenzial der Brachiopoden des Muschelkalks Hans Hagdorn	304
4.8	Biostratigraphie der marinen Reptilien der Germanischen Mitteltrias Hans Hagdorn	308
4.9	Biostratigraphie der Dasycladaceen und Characeen des Muschelkalks Hans Hagdorn	311
4.10	Palynomorphe des Muschelkalks Carmen Heunisch	314
5.	Leitbänke und Folgen	
5.1	Leitbänke der Muschelkalk-Gruppe und Abgrenzung der Folgen m1 bis m9 Hans Hagdorn, Elmar Kramm, Theo Simon	321
6.	Interpretationsmodelle	
6.1	Zyklostratigraphie des Muschelkalks Edgar Nitsch, Elmar Kramm, Theo Simon	347
6.2	Faziesräume des Muschelkalks Edgar Nitsch, Hans Hagdorn	382
7.	Geochemische und geophysikalische Methoden	
7.1	Geochemie, Isotope und Mineralogie des Muschelkalks Thomas Voigt, Matthias Franz	410
7.2	Log-Stratigraphie im Muschelkalk Karl-Christian Käding, Simone Röhling, Theo Simon	427
8.	Lithostratigraphie	
8.1	Die Muschelkalk-Gruppe – Definition und Grenzziehungen Hans Hagdorn, Theo Simon	433
8.2	Lithostratigraphie der Unterer-Muschelkalk-Subgruppe Hans Hagdorn, Theo Simon, Doris Dittrich, Gerd Geyer, Elmar Kramm, Thomas Voigt	451
8.3	Lithostratigraphie der Mittlerer-Muschelkalk-Subgruppe Theo Simon, Hans Hagdorn, Doris Dittrich, Simone Röhling, Thomas Voigt	495
8.4	Lithostratigraphie der Oberer-Muschelkalk-Subgruppe Hans Hagdorn, Theo Simon, Doris Dittrich, Robert Ernst, Jochen Farrenschon, Walter Freudenberger, Gerd Geyer, Elmar Kramm, Ulrich Vath	521
8.5	Lithostratigraphie der Eschenbach-Formation Volker Friedlein, Gerd Geyer	593
8.6	Lithostratigraphie der Grafenwöhr-Formation Volker Friedlein, Gerd Geyer	606
Teil 2		
9.	Regionale Stratigraphie des Muschelkalks	
9.1	Der Muschelkalk des Norddeutschen Beckens Matthias Franz, Heinz-Gerd-Röhling, Simone Röhling, Friedrich-Wilhelm Luppold	621
9.2	Der Muschelkalk am Niederrhein und in der Nordeifel Jochen Farrenschon	663
9.3	Der Muschelkalk im Osnabrücker Bergland Jochen Farrenschon, Elmar Kramm, Hans Hagdorn	672

9.4	Der Muschelkalk im Weserbergland und in Südniedersachsen Jochen Farrenschon, Hans Hagdorn, Elmar Kramm	683
9.5	Der Muschelkalk im nördlichen Harzvorland Elmar Kramm, Simone Röhling, Hans Hagdorn	707
9.6	Der Muschelkalk im östlichen Brandenburg und in der Lausitz Elmar Kramm, Hans Hagdorn	727
9.7	Der Muschelkalk in Hessen Elmar Kramm, Hans Hagdorn, Heiner Heggemann	744
9.8	Der Muschelkalk in der Thüringer Mulde Elmar Kramm, Willy Ockert, Hans Hagdorn, Thomas Voigt, Klaus Ehrhardt	762
9.9	Der Muschelkalk im westlichen Franken (Bayern) und Südthüringen Gerd Geyer, Robert Ernst, Walter Freudenberger, Hans Hagdorn, Elmar Kramm, Willy Ockert, Oliver Schmid (†), Markus Wilmsen	800
9.10	Die Randfazies des Muschelkalks in Nord-Bayern Gerd Geyer, Volker Friedlein	854
9.11	Der Muschelkalk in der Trierer Bucht Doris Dittrich	895
9.12	Der Muschelkalk im Saarland und in der Pfalz Doris Dittrich, Jahn Jochen Hornung	932
9.13	Der Muschelkalk im nördlichen Baden-Württemberg Hans Hagdorn, Theo Simon	962
9.14	Der Muschelkalk im mittleren und südlichen Baden-Württemberg Theo Simon, Andreas Etzold, Robert Ernst, Hans Hagdorn, Manfred Lutz, Edgar Nitsch	1007
9.15	Der Muschelkalk im Untergrund von Oberschwaben und Schwäbischer Alb Edgar Nitsch, Theo Simon	1075
10. Der Muschelkalk in den Nachbarländern		
10.1	Der Muschelkalk in der Schweiz Peter Jordan, Annette E. Götz	1088
10.2	Der Muschelkalk im nordöstlichen Frankreich Marc Durand, Hans Hagdorn	1096
10.3	Der Muschelkalk in Luxemburg und Belgien Doris Dittrich	1122
10.4	Muschelkalk in the southern North Sea region, German North Sea sector, the Netherlands, northeast Belgium and England Marc Geluk (†), Heinz-Gerd Röhling, Geoffrey Warrington	1136
10.5	Der Muschelkalk in Polen Joachim Szulc (†), Hans Hagdorn	1152
11. Die Mitteltrias im Tethys-Bereich		
11.1	Die tethyale Mitteltrias in den bayerischen Nördlichen Kalkalpen Thomas Hornung, Ulrich Teipel	1180
12. Der Muschelkalk als Rohstoff und Baustoff		
12.1	Nutzbare mineralische Rohstoffe aus dem Muschelkalk in Deutschland Simone Röhling, Heinz-Gerd Röhling, Hans Hagdorn	1215
13. Verzeichnisse		
13.1	Aufschlüsse und Bohrungen Robert Ernst, Hans Hagdorn, Theo Simon	1239
13.2	Kürzel der lithostratigraphischen Einheiten Theo Simon, Hans Hagdorn, Robert Ernst	1252
13.3	Verzeichnis und Anschriften der Autorinnen und Autoren	1254



GEOMONTAN
Gesellschaft für angewandte Geologie mbH Freiberg



WIR HABEN DEN DURCHBLICK

Geologie und Rohstoffe

- Kohlengeologie und Kraftwerksreststoffe
- Geologische Kartierung und Exploration
- Bergbauplanung Steine-Erden-Rohstoffe
- Bodengeologie und Rekultivierung

Hydrogeochemie

Geotope und Geo-Edutainment

Deponien und Altlasten



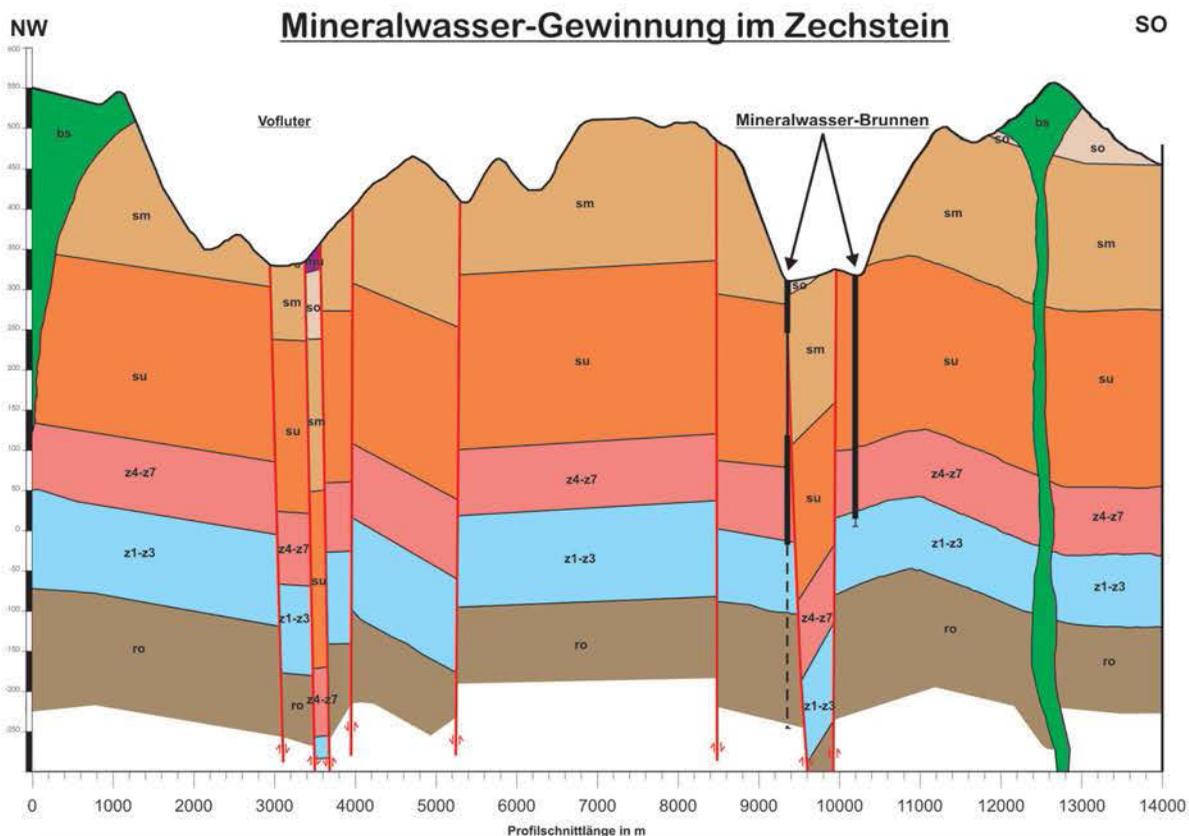
www.geomontan.de



Büro für
Hydrogeologie und
Umwelt GmbH

Hydrogeologie
Grundwassermodelle
Boden- und Grundwasserschutz
Geothermie
Brunnenbau
Rohstoffgewinnung
Wirtschaftlichkeitsanalysen

Dipl.-Geologe Dr. Bernd Hanauer
Dipl.-Geologe Dr. Walter Lenz
Dipl.-Geologe Dr. Christoph Möbus
Europastraße 11
35394 Gießen
Telefon: 06 41 / 9 44 22 0
Telefax: 06 41 / 9 44 22 11
E-Mail: hg@buero-hg.de
Internet: www.buero-hg.de



Legende

Tertiär		Trias		Perm	
bs Basalte/Phonolite	mu Unterer Muschelkalk	so Oberer Buntsandstein	sm Mittlerer Buntsandstein	z4-z7 Aller-Fulda-Folge (Zechstein)	z1-z3 Werra-Leine-Folge (Zechstein - Kalkstein/Dolomit)
	ro Rotliegendes				
				GwGeringleiter	GwGeringleiter
					Kluft-/Karst-GwLeiter
					GwGeringleiter

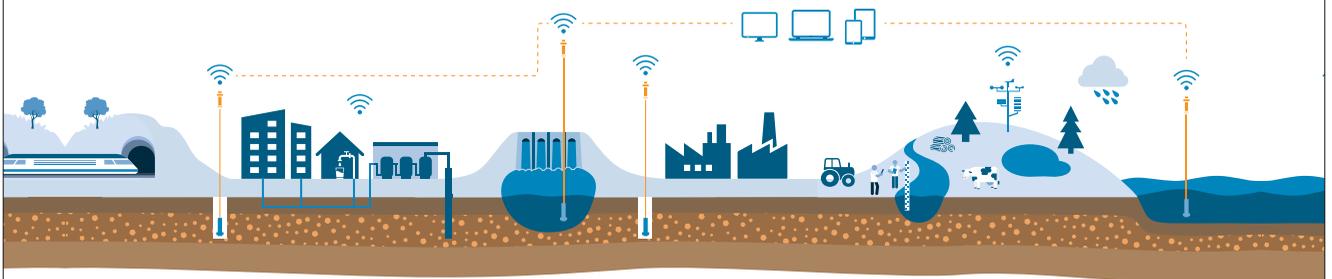
GRUND- UND OBERFLÄCHENWASSER PROFESSIONELL ÜBERWACHEN UND MANAGEN



GW Base® GW Web®

UNSERE SOFTWARELÖSUNGEN FÜR DIE WASSERWIRTSCHAFT 4.0

- Langzeitmonitoring von Grund- & Oberflächenwasser
- Digitale Brunnenakte
- Technische Messstellenausrüstung
- Grenzwertüberwachungs- und Frühwarnsystem
- Hydrogeologische Gutachten und Planung
- Messstellenkataster
- Wasserstände und Fördermengen
- Wasserproben, Bodenproben und Laboranalysen
- Geologie und Bohrdaten, Bohrprofile & Ausbauskizzen
- Messwertstatistik
- Berichte und Reports
- Echtzeitanbindung von autom. Sensoren & Loggern
- Altlastenüberwachung und Beweissicherung
- Online-Datenzugriff
- Gangliniendiagramme, Gleichenpläne, Tiefenprofile
hydrochemische Diagramme, etc.



www.ribeka.com

ribeka

Bewährtes neu denken

vdz



„Wir bieten Ihnen ein umfangreiches Paket an Leistungen für die gesamte Wertschöpfungskette vom Zement über den Beton bis hin zum Bauwerk.“

Martin Schneider
Hauptgeschäftsführer VDZ

Unsere Leistungen

Prozessoptimierung

- Technische Audits
- Analyse Brennverfahren
- Optimierung des Abbaubetriebes
- Energieoptimierung von Aufbereitungsverfahren

Instandhaltung

- Inspektion und Überwachung von Aufbereitungsmaschinen
- Vermessung von rotierenden Anlagenteilen und Fördereinrichtungen
- Schadensanalytik und Instandsetzungsplanung

Nachhaltigkeit

- Ökobilanzierung (LCA)
- Umweltproduktdeklarationen
- Nachhaltigkeitsbewertungen

Zertifizierung

- System- und Produktzertifizierung
- CSC-Zertifizierungen
- CO₂-Audits
- Energieaudits nach DIN EN 16247-1
- Full Audit Services

VDZ

Toulouser Allee 71

40476 Düsseldorf

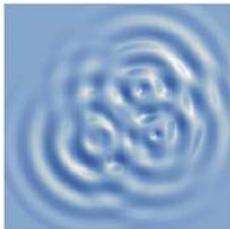
vdz@vdz-online.de

www.vdz-online.de



STEINZEIT HAT ZUKUNFT –
FÜR INNOVATION AM BAU

© HeidelbergCement AG / Steffen Fuchs



Büro für Geohydrologie und Umweltinformationssysteme

Dr. Brehm & Grünz GbR - Diplom Geologen BDG
Technologiezentrum Bielefeld

Meisenstraße 96 • DE-33 607 Bielefeld

Fon: 0521/2997-250 • Fax: 0521/2997-253

www.bgu-geoservice.de • info@bgu-geoservice.de

- Grundwassermodelle
- Stofftransportmodelle
- Wärmetransportmodelle
- Wasserrechtsanträge
- Schutzgebietsgutachten
- Sanierung von Grundwasserschäden
- Geoinformatik / Geostatistik
- Planung und Gutachten

GEOTECHNIK

- **Baugrunderkundung**
- **Gutachten**
- **Dienstleistungen**
 - **Bohrungen**
 - **Drucksondierungen**
- **Ingenieurgeologie**

UMWELT

- **Geothermie**
- **Hydrogeologie**
- **Altlasten**

BAUSTOFFE

- **Boden / Flüssigboden**
- **Beton**
- **Asphalt**



Die Deutsche Geologische Gesellschaft – Geologische Vereinigung dankt für die Unterstützung:



Vorwort

Mehr als 20 Jahre nach Ablauf des einmal optimistisch angestrebten Termins für die Veröffentlichung der „Muschelkalk-Synopsis“ ist der Band endlich fertig geworden. Wir denken aber, dass sich das Warten gelohnt hat, denn über die Jahre haben sich Konzeption und Umsetzung des Bandes im Ganzen und in den Einzelkapiteln präzisiert und verdichtet. Ziel unserer Schriftleitung war es, über eine Sammlung von Aufsätzen zum Thema hinaus eine Monographie zum Muschelkalk vorzulegen, die in aufeinander abgestimmten Kapiteln alle wesentlichen Aspekte behandelt, einschließlich paläoökologischer und genetischer Fragestellungen. Die Verbreitung des Muschelkalks in Europa erforderte auch den Blick auf die Nachbarländer und die dortige Ausbildung und Gliederung sowie auf mitteltriassische Gesteine in den deutschen Alpen. Insgesamt soll der Band dem Leser die Möglichkeit bieten, sich in allen Fragen zum Muschelkalk nach aktuellem Sachstand zu informieren und die Forschungsliteratur bibliographisch zu erschließen.

Dabei vertreten die 41 Autorinnen und Autoren aus acht europäischen Staaten in manchen Fragen auch Ansichten, die nicht von den Schriftleitern geteilt werden. Auch ließen sich in den 56 Kapiteln Wiederholungen nicht vermeiden, denn die Kapitel sollten als selbständige Einheiten auch separat verständlich und nutzbar bleiben und die verarbeitete Forschungsliteratur jeweils vollständig verzeichnen. Hinweise auf die anderen Kapitel erleichtern den Gebrauch und ermöglichen eine Vertiefung und leichtere Erschließung des Textes. Die Kapitel sind übersichtlich strukturiert und, wo möglich, formalisiert, so dass sich spezielle Information gezielt finden lässt. Besonderer Wert wurde auf die Illustration gelegt. Angesichts der langen Erstellungs- und Drucklegungszeit gestaltete sich die Harmonisierung zwischen den Kapiteln als Herausforderung und war nicht bis in alle Einzelheiten möglich.

Die 15 Regionalkapitel spiegeln Gliederungen, die sich aus der föderativen Struktur des Landes und damit aus der Wissenschaftsgeschichte ergeben haben. So werden Osnabrücker Bergland, Weserbergland, Harzvorland, Brandenburg und auch Hessen und Thüringen separat behandelt, obwohl der dortige Muschelkalk zum Faziesraum des Norddeutschen Hauptbeckens gehört. Wegen des obertägigen Ausstrichs und der folglich langen Erforschungszeit und -intensität – gerade auch in paläontologischer Hinsicht – ist dort die Datendichte um ein Vielfaches größer als aus dem nur durch Bohrungen erschlossenen Bereich.

Wegen der Bedeutung des Muschelkalks über das Interesse der stratigraphisch orientierten Geologie hinaus wurde paläontologischen und wissenschaftsgeschichtlichen Fragestellungen viel Raum gewidmet. Damit sollten auch Paläontologen und Fossiliensammler eine umfassende Darstellung des Muschelkalks und der zeitlich entsprechenden Einheiten der tethyalen Mitteltrias in den deutschen Alpen finden. Auch sollte die wirtschaftliche Bedeutung der verschiedenen Produkte aus Muschelkalkgesteinen dargestellt werden.

Den Druck des Bandes durften vier Autoren nicht mehr erleben, die viel zu früh verstorben sind: Marc Geluk, Siegfried Rein, Oliver Schmid und Joachim Szulc. Wir werden sie nicht vergessen.

Schließlich gilt es, allen zu danken, ohne die die Fertigstellung dieser Muschelkalk-Synopsis nicht möglich gewesen wäre. In erster Linie sind dies die Autorinnen und Autoren, die ihre Expertise und ihre Arbeitszeit eingebracht haben. All denen, die ihre Kapitel schon vor Jahren eingereicht hatten und diese z.T. mehrfach aktualisieren mussten, danken wir für ihre Geduld und ihr Verständnis für die lange Zeit, über die sich die Herausgabe der Synopsis hingezogen hat. Wir danken den Mitgliedern der Subkommission Perm-Trias der DSK, besonders den aktiven Mitarbeitern in der AG Muschelkalk, für ihr Engagement in oft kontroversen, doch stets zielführenden Diskussionen. Wir danken den Gutachtern, die keine Mühe scheuten, die Kapitel zu verbessern, Heinz-Gerd Röhling für die Einbettung des Bandes in die Schriftenreihe der DGGV und Einwerbung von Spenden für die Herstellung, Nils Mecke, Mecke Druck und Verlag, Duderstadt, der unsere Wünsche zur Layoutgestaltung umgesetzt hat, der DGGV für die Aufnahme des gewichtigen Bandes in ihre Schriftenreihe, und nicht zuletzt den Sponsoren, ohne die es nicht möglich gewesen wäre, den Band zu einem akzeptablen Preis zu veröffentlichen. Schließlich danken wir allen Betrieben und öffentlichen Einrichtungen, die uns Zugang zu Steinbrüchen und Bohrgut gestatteten oder Daten verfügbar machten. Ganz besonderer Dank gilt Karin Hagdorn und Margarete Simon, die es über lange Jahre geduldig ertragen haben, wenn wir an der Synopsis arbeiteten.

Im Herbst 2020

Hans Hagdorn

Theo Simon

Widmung

Der vorliegende Muschelkalk-Band der „Stratigraphie von Deutschland“ sei zwei Kollegen gewidmet, die sich auf unterschiedliche, aber jeweils ganz besondere Weise um die Stratigraphie des Muschelkalks und die Entstehung dieses Bandes verdient gemacht haben.

Als kartierender Landesgeologe im komplex strukturierten Nordhessen umfasste Manfred Horns stratigraphisches Spektrum weite Bereiche des Phanerozoikums. Dabei hat aber nach Ausweis seiner Publikationen, die sich aus der Kartiertätigkeit ergaben, die Trias eine besondere Rolle gespielt. Manfred Horn war stets gern bereit, sein Wissen und seine Arbeitskraft für andere einzubringen, und so nimmt es nicht wunder, dass er 1988 die Koordination der Arbeitsgruppe Muschelkalk in der Subkommission Perm–Trias der Deutschen Stratigraphischen Kommission übernahm und bis zu seinem Tod ausübte. Die in den 1990er Jahren in der AG durchgeführten Vorarbeiten zur Muschelkalk-Synopsis machten Hoffnung, dass die Arbeit in absehbarer Zeit abgeschlossen werden könnte. Dies erwies sich als Wunschdenken. Manfred Horn setzte sich für wichtige Entscheidungen ein, so die Abgrenzung und Benennung von Formationen – Diemel-, Meißner- und Warburg-Formation und ihre Verankerung im nordhessisch-westfälischen Grenzbereich – und die methodische Trennung von lithostratigraphischen Einheiten und geochronologischen Folgen.

Heinz Kozur begleitete die Beschäftigung mit der Trias seit seiner Dissertation 1971. Mit fast 600 Publikationen zur Stratigraphie und Paläoökologie, Bioevents, Paläoklimatologie und Paläogeographie von Perm und Trias war er weltweit gefragter Spezialist für zahlreiche Mikrofossilgruppen, insbesondere Conodonten und Radiolarien sowie für Conchostraken, die er zur globalen Korrelierung terrestrischer Triasgesteine nutzte. Heinz Kozurs Mitteltrias-Arbeiten setzten einen Standard für die biostratigraphische Zonierung und für die Korrelierung der Germanischen mit der tethyalen Trias. Mit seinem globalen, auf die biostratigraphische Korrelation gerichteten Blick zeigte sich Heinz Kozur gegenüber manchen Entwicklungen in der SKPT und in der AG Muschelkalk reserviert. So hielt er das Folgen-Konzept für unnötig – obwohl seine eigene Gliederung der germanischen Mitteltrias ja selbst auf Leitbänken beruhte. Gerne ließ er aber sein umfassendes und jederzeit parates Wissen in die Arbeit der AG Muschelkalk einfließen.

Der allzu frühe Tod der beiden Kollegen hat eine empfindliche Lücke in der Subkommission Perm–Trias und der AG Muschelkalk hinterlassen, und das nicht nur in fachlicher, sondern auch in menschlicher Hinsicht. Subkommission Perm–Trias und AG Muschelkalk verdanken den beiden Kollegen viel.

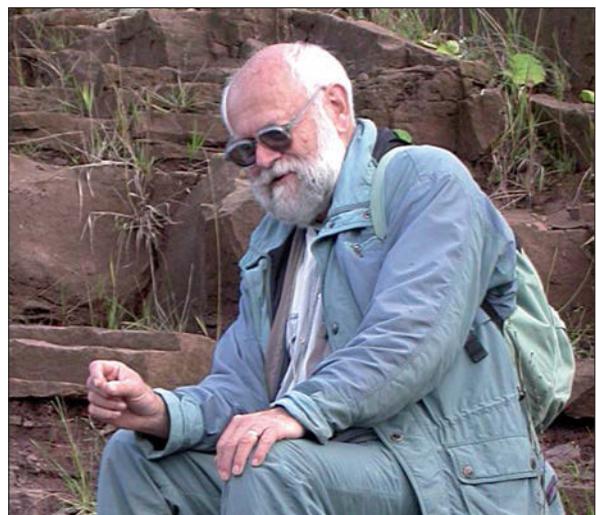
HOTH, K., WALTER, H. & FREYER, G. (2004): Manfred Horn, ein hessischer Landesgeologe aus Masuren. – Geologisches Jahrbuch Hessen, 131: 225-227.

LUCAS, S. G. & BACHMANN, G. H. (2013): Dedication to Heinz Kozur. – In: TANNER, L.H., SPIELMANN, J. A., & LUCAS, S. G. (eds.), The Triassic System. New Mexico Museum of Natural History and Science, 61: 1-22.



Manfred Horn

* 24. Februar 1934 in Sensburg (Ostpreußen)
† 5. März 1999 in Tel Aviv (Israel)



Heinz Kozur

* 26. März 1942 in Hoyerswerda,
† 20. Dezember 2013 in Budapest (Ungarn)

REIN, S. (2020): Georg Christian Füchsel (1722–1773) – Pionier der Stratigraphie. – In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Koordination und Redaktion: HAGDORN, H., SIMON, T., für die Subkommission Perm-Trias): Stratigraphie von Deutschland XIII. Muschelkalk. – Schriftenr. Dt. Ges. Geowiss., 91: S. 15-20, 2 Abb.; Berlin.

Georg Christian Füchsel (1722–1773) – Pionier der Stratigraphie

[Georg Christian Füchsel (1722–1773) – Pioneer in Stratigraphy]

Siegfried Rein (†)

vormals Hubertusstraße 69, D-99094 Erfurt

Kurzfassung

Georg Christian Füchsel (1722–1773) aus Rudolstadt (Thüringen) begründete 1761 den Begriff der geologischen Formation und beschrieb und benannte nach neunjähriger Feldarbeit die Schichtenfolge des Thüringer Schiefergebirges und Thüringer Waldes vom Grundgebirge bis zum Muschelkalk in 15 Einheiten, die er in seiner geologischen Karte mit Zahlen kennzeichnete. Seiner bahnbrechenden Arbeit blieb der Erfolg jedoch versagt, weil sie durch die Erfurter Akademie der Wissenschaften in schwer verständlichem Latein veröffentlicht wurde. Im Geist der Aufklärung wandte sich Füchsel gegen die Vorstellung der Diluvianer von Ablagerungen aus der biblischen Sintflut, sondern übertrug die Schichtenfolge gemäß dem Lagerungsgesetz in eine chronologische Abfolge von unschätzbar langer Zeitdauer. Auch unterschied er terrestrische und marine Ablagerungen aufgrund verschiedenartiger Fazies und Fossilien. Seine Vorstellungen publizierte er nochmals 1773 anonym in größerem Zusammenhang in deutscher Sprache. Neben Füchsels geologischer Pionierleistung wird sein Lebensgang als Arzt, Berater des Schwarzburg-Rudolstädter Fürstenhauses und Mitglied der Erfurter Akademie der Wissenschaften skizziert.

Abstract

As a result of nine years of geological fieldwork, Georg Christian Füchsel (1722–1773) from Rudolstadt (Thuringia) described and named the geological column of the Thuringian Slate Mountains and the Thuringian Forest from the basement up to the Muschelkalk. In this scientific paper that appeared in 1761 he established the term formation and included a map indicating 15 stratigraphic units by means of numbers. However, his pioneering paper remained largely unnoticed because it was published in poor Latin by the Erfurt Academy of Sciences. Obligated to the spirit of enlightenment Füchsel rejected diluvianist explanations of the strata caused by the Great Flood but translated his observations in accordance with the stratification rule into a geochronological sequence of unestimable long time. He also differentiated terrestrial and marine deposits on the basis of different facies and fossils. In 1773 he published his ideas

again but anonymously in a wider context in German language. In addition to his geological pioneer work, the paper presents a sketch of his vita as a doctor, as a consultant of the princes of Schwarzburg-Rudolstadt, and as a member of the Erfurt Academy of Sciences.

Schlüsselwörter: Geschichte der Geologie, Schichtenfolge, Thüringen, Aufklärung

Key words: history of geology, stratigraphic column, Thuringia, Enlightenment

1. Entwicklung der Muschelkalkstratigraphie

Der Begriff *Muschelkalk* im Sinn einer bestimmten, von anderen Gesteinen unterscheidbaren Einheit, wurde vor nunmehr über 250 Jahren geprägt und gehört damit zu den ältesten stratigraphischen Begriffen überhaupt. Georg Christian Füchsel (1722–1773) aus Rudolstadt in Thüringen trug mit seiner *Historia terrae et maris* (FÜCHSEL 1761) entscheidend zum Fundament der Geologie als einer eigenen Wissenschaft bei. Mit der chronologischen Abfolge von Gesteinen kambrischen Alters bis zum Muschelkalk begründete er die Chronostratigraphie und verlängerte mit der Entdeckung der geologischen Tiefenzeit die Vorstellung vom Alter der Erde in einer bis dahin ungeahnten Weise. In seiner chronologischen Abfolge beschreibt er den Muschelkalk als jüngste lithostratigraphische Gesteinseinheit in Thüringen. Füchsel bietet mit seinem Werk somit auch die Vorlage für das Verständnis der Muschelkalkstratigraphie und begründete den Begriff der geologischen Formation. Die von Füchsel initiierte Erforschung des Muschelkalks war im Wesentlichen 70 Jahre später mit Friedrich von Albertis Epochenwerk von 1834 abgeschlossen, in dem er das System der Trias begründete und benannte (ALBERTI 1834).

Darstellungen der Wissenschaftsgeschichte finden sich bei KEFERSTEIN (1840), dann bei ZITTEL (1899) und, was die Germanische Trias anbelangt, am detailliertesten bei BENECKE (1877). Zusammenfassende neuere Darstellungen zur Germanischen Trias geben NITSCH (1996) sowie HAGDORN & NITSCH (1999; vgl. auch Kap. 2.1) und zur Entwicklung des chronologischen Stufenschemas LUCAS (2011).

2. Georg Christian Füchsel und seine „natürliche“ Auslegung der Erdgeschichte

Johann Gottlob Lehmanns (1719–1767) *Versuch einer Geschichte von Flötzgebirgen* von 1756 gilt als Beginn der Erforschung des Deckgebirges in Mitteleuropa. Lehmann war Mitglied der Königlichen Akademie der Wissenschaften und als preußischer Bergrat auch verantwortlich für den Bergbau. Er dokumentierte die bei Bergleuten bestens bekannte Schichtenfolge aus dem Steinkohlen- und Kupferschieferbergbau des südlichen Harzvorlands genau und zutreffend. Dabei erkannte er, dass dieselben Schichten überall in seinem Untersuchungsgebiet von Ilfeld über Mansfeld bis Wettin/Löbejün in derselben Abfolge über dem Grundgebirge wiederkehren. Gemäß der biblischen Chronologie deutete Lehmann die Entstehung der vom Permokarbon bis zum Oberen Zechstein reichenden Schichten der „Flötzgebirge“ als Sedimentation im Jahr der Sintflut. Mit seinem Versuch einer Korrelierung mit der tertiären Schichtenfolge und dem Muschelkalk des nördlichen Harzvorlandes hatte er deshalb verständlicherweise Schwierigkeiten. In Lehmanns für die Bergbaupraxis bedeutsamer Korrelation von Fundhorizonten sah FREYBERG (1955) die Begründung der mitteleuropäischen Stratigraphie.

Füchsel hatte ein ganz anderes Wissenschaftskonzept als Lehmann, der seine Schichtengliederung *durch eine unnatürliche Auslegung für die Naturkunde unbrauchbar gemacht* habe (FÜCHSEL 1773: §35). Im Unterschied zu Lehmann, der als Bergrat befugt war auf das Alltagswissen der Bergleute zurückzugreifen, eignete sich Füchsel als Idealist seine Erkenntnisse privat durch geologische Feldbeobachtung und auf eigene Kosten an. Er hatte ab 1743 in Leipzig neben Medizin vor allem Mineralogie, Chemie und Theologie studiert, jedoch begeistert vom rationalistischen Gedankengut der Aufklärungszeit 1747 die Universität ohne akademischen Abschluss verlassen, um die Natur mit „beobachtender Vernunft“ direkt als Erkenntnisquelle zu studieren. Die Ergebnisse seiner neunjährigen Feldarbeit, die 1761 im zweiten Band der Erfurter Akademieschriften erschienen (FÜCHSEL 1761), beruhen zum einen auf seinen im Studium erworbenen Kenntnissen der Mineralogie und Chemie, verbunden mit der konsequent angewandten aktualistischen These *wenn wir an jedem erst betrachten, wie und was es ist und hierauf nachforschen, was und wie es einmal war* (FÜCHSEL 1773: §204), zum anderen auf seiner deistisch-naturwissenschaftlichen Option, mit der er sich vom Bibelwissen löste und damit die von der Genesis gesetzten räumlichen und zeitlichen Grenzen bis ins Undenkliche überschritt

(FÜCHSEL 1773: §191). Als Empiriker ließ Füchsel nur die Beobachtung gelten *damit man sehe, dass ich die Natur nicht nach meinem Sinn, sondern meinen Sinn nach der Natur gebogen habe* (FÜCHSEL 1773: §152).

Als Neptunist deutete er die Entstehung des wechselnden Schichtbaues der Erde aktualistisch als das Ergebnis eines uralten Meeres. Dabei sei die Ablagerung der Schichten ursprünglich immer horizontal erfolgt, *wobei die untersten Schichten die ältesten, die obersten die letzten und somit jüngsten sind* (FÜCHSEL 1773: § 37). Je nach Fazies und Fossilinhalt der Gesteinsschichten unterscheidet er *Meergeburten* und *Landgeburten* (FÜCHSEL 1773: §15), *denn jedes Gestade hat ihr Eigenes* (FÜCHSEL 1773: §21). An manchen älteren Schichten des Grundgebirges ist die Zuordnung zweifelhaft (FÜCHSEL 1773: §16). Er erkennt erdinnere mechanische Kräfte, welche die Erdoberfläche veränderten. Die aus der waagerechten Lagerung abweichenden Schichten seien nach Erdbeben entstanden. An Diskordanzen werde deutlich, dass die Schichten erst gehärtet sein mussten bevor sie bewegt wurden oder zerbrachen (FÜCHSEL 1761: §95).

Nach Füchsel ist Erdgeschichte die wechselvolle Geschichte einer uralten Erde und eines uralten Meeres. Er schreibt, auch in der Vergangenheit hätten immer die gleichen physikalischen Prozesse wie in der Gegenwart gewirkt. Die Berechnung der Zeit für diese Vorgänge sei nach Jahreszahlen dem Menschen nicht möglich (FÜCHSEL 1773: §63). Alle Schichten, *die sich nach ihrem Bestande und Lager gleichen* bildeten ein Gebirge, d.h. eine Gesteinseinheit, eine Formation (FÜCHSEL 1773: §40). Auf diese Weise unterscheidet er acht Gebirge mit sieben Unterlagern, die in seiner geologischen Karte als Zahlenfolge von 10 bis 25 erscheinen. Die chronologische Aufeinanderfolge der Gebirge (Formationen) in der Geschichte der Erde sei, unabhängig von ihrer Position zur Erdoberfläche, immer gleich (FÜCHSEL 1773: §41). Damit nähert er sich bereits einer echten Chronostratigraphie. Aktualistisch verbindet Füchsel jede Beschreibung der Schichten und Gebirge mit der Art und Weise ihrer Entstehung und bewundert das jeweils für ihre Bildung benötigte unschätzbare Ausmaß der Zeit. Hierin sieht er schließlich den Beweis für den Zeitkreis einer uralten Erde, in dem es keine Spur eines Anfangs und kein Anzeichen eines Endes gibt (FÜCHSEL 1773: §190) und legt mit der Entdeckung der Tiefenzeit das Fundament der modernen Geochronologie.

Als Mitglied der Kurfürstlich-Mainzischen Akademie nützlicher Wissenschaften zu Erfurt wollte Füchsel seine Forschungsergebnisse unter dem Titel *Geschichte des Landes und des Meeres, aus der Ge-*

schichte Thüringens durch Beschreibung der Berge ermittelt auf Deutsch publizieren, doch wurde sein Manuskript von einem wenig sachkundigen Übersetzer in ein schwer verständliches Latein übertragen und unter dem Titel *Historia terrae et maris, ex historia Thuringiae, per montium descriptionem, eruta* in den wenig verbreiteten Erfurter Akademieschriften veröffentlicht (FÜCHSEL 1761). Deshalb blieben seine Erkenntnisse unbeachtet. 1773 veröffentlichte Füchsel dann seine Erkenntnisse in größerem Zusammenhang erneut, nun in deutscher Sprache, aber anonym (ANONYMUS 1773).

3. Füchsel und der Muschelkalk als Formation

In Füchsels *Historia terrae et maris* wird vom Übersetzer *series montana* allgemein für den Begriff „Gebirge“ verwendet und *series testaceo-calcareo* (FÜCHSEL 1761: §10) steht hier im Sinne einer stratigraphischen Formationsbezeichnung für den Muschelkalk. Füchsel selbst verwendete, stets der Aufklärung verbunden, keine lateinischen Begriffe. In seinem anonym gedruckten Hauptwerk von 1773, dem *Entwurf zu der ältesten Erd- und Menschengeschichte nebst einem Versuch den Ursprung der Sprache zu finden*, fasst er auf Deutsch noch einmal seine geologischen Erkenntnisse auch für den Muschelkalk zusammen: *Das jüngste Gebirge von Thüringen, besteht aus Muschelkalk, welcher nach verschiedenen Abständen, oder besonderen Ketten von solchen Bergen, meistens von Abend gegen Morgen läuft. Wer die ganze Höhe, Zahl und verschiedene Stärke seiner Schichten, den Gehalt der Muscheln nach ihrem Alter und ordentlich verteilten Geschlechtsarten, nebst dem Bestand der Kalcherde, oder ehemaligen Meerschlamme, nur ungefähr zu schätzen sucht, wird den Zeitraum, innerhalb dem dieses alte Meer eine so große Menge Schlamm absetzte, so viel Seethiere groß zog, und dabei erst jeder Schicht vom Schlamme die Härte, wodurch sie sich von der anderen absondern lässt, geben konnte, unmöglich durch ein paar hundert Sonnenjahre bestimmen wollen. Zumal wenn er des Meeres jetzige Beschaffenheit, welche so lange unverändert dergleichen Kalkschlamm gab, damit verbinden will. Unsere Nachkommen, denen das Wachstum und Alter dieser Seethiere zu erforschen vielleicht aufgehoben seyn wird, mögen künftig die Jahre, genauer bestimmen.* (FÜCHSEL 1773: §27). Mit Füchsels biostratigraphisch bedeutsamer Beobachtung ... *wie die vielen Nautiliten und Ammoniten des Muschelkalks im mittleren Thüringen beweisen, welche an der Saale hin, darinnen desto seltener vorkommen und doch werden Terebratuliten, wohl an jedem Ort im Muschelkalche sich finden lassen* beschreibt er unbewusst die unterschiedliche Fossilführung des Unteren gegenüber dem Oberen Muschelkalk. (FÜCHSEL 1773: §57).

4. Füchsels geologische Karte – kartographische Anlage der *Historia terrae et maris* von 1761

Das von Füchsel zwischen 1747 und 1756 geologisch kartierte Gebiet erstreckt sich über eine Fläche von ca. 2500 km². Erschwert wurde seine Arbeit im Gelände durch die territoriale Aufsplitterung in mehrere Kleinstaaten. Zudem besaß Füchsel dafür keine topographische Vorlage. Vergleicht man seine „frei Hand“ gezeichnete Darstellung des Gebiets mit der modernen geologischen Karte (SEIDEL 1972), wird die Genialität seiner Karte besonders deutlich, wenn seine nach Zahlen (10 bis 25) bezeichneten Gesteinseinheiten farbig angelegt werden, wie in Abb. 1 gezeigt.

Die jüngste Formation in seiner Karte ist der Muschelkalk mit der Bezeichnung 10. Er ist als ungeteilte lithostratigraphische Einheit ausgewiesen. Die zwischen Rudolstadt (R) und Saalfeld (S) am Nordoststrand des Thüringer Schiefergebirges auslaufende Eichenberg-Gotha-Saalfelder Störungszone ist treffend erfasst. Auch den Fazieswechsel an der Röt-Muschelkalk-Grenze (11) hat Füchsel durchgehend exakt als Formationsgrenze kartiert. Des Weiteren unterteilt er seine „Sandgebirge“ gemäß den heutigen lithostratigraphischen Einheiten Mittlerer Buntsandstein (12) und Unterer Buntsandstein (13), den Zechstein in vier weitere Gebirge (14 bis 17), die dem Oberen und Mittleren Zechstein, dem Kupferschiefer und dem Zechsteinkonglomerat entsprechen. Die Geologie der südlich angrenzenden Bereiche vom Thüringisch-Vogtländischen Schiefergebirge bis zum Thüringer Wald ist äußerst kompliziert. Selbst hier hat Füchsel acht weitere lithostratigraphische Gesteinseinheiten (18 bis 25) nebst ihren tektonisch bedingten Besonderheiten erkannt und korreliert. Auch wenn die numerische Reihung der Formationen mit der chronologischen Abfolge teilweise divergiert, bleibt bereits die Erfassung der problematischen geologischen Verhältnisse genial.

5. Georg Christian Füchsel – eine außergewöhnliche Persönlichkeit

Am 14. Februar 1722 wurde Georg Christian Füchsel in Ilmenau geboren. Der Vater, ein Bäckermeister, stirbt noch vor seiner Geburt und die Mutter bleibt mit dem Jungen allein. Erst 1727 heiratet sie in Rudolstadt den Sattler Daniel Stichling. Doch auch dieser Mann stirbt bereits fünf Jahre später. Sie ist nun zusätzlich verantwortlich für das von Stichling geerbte Wohnhaus mit einer Sattlerei und dem inzwischen zehnjährigen Sohn. Füchsels Kindheit und Jugend war durch diese Schicksalsschläge nicht leicht und so entstand vermutlich eine starke Mutter-Sohn-

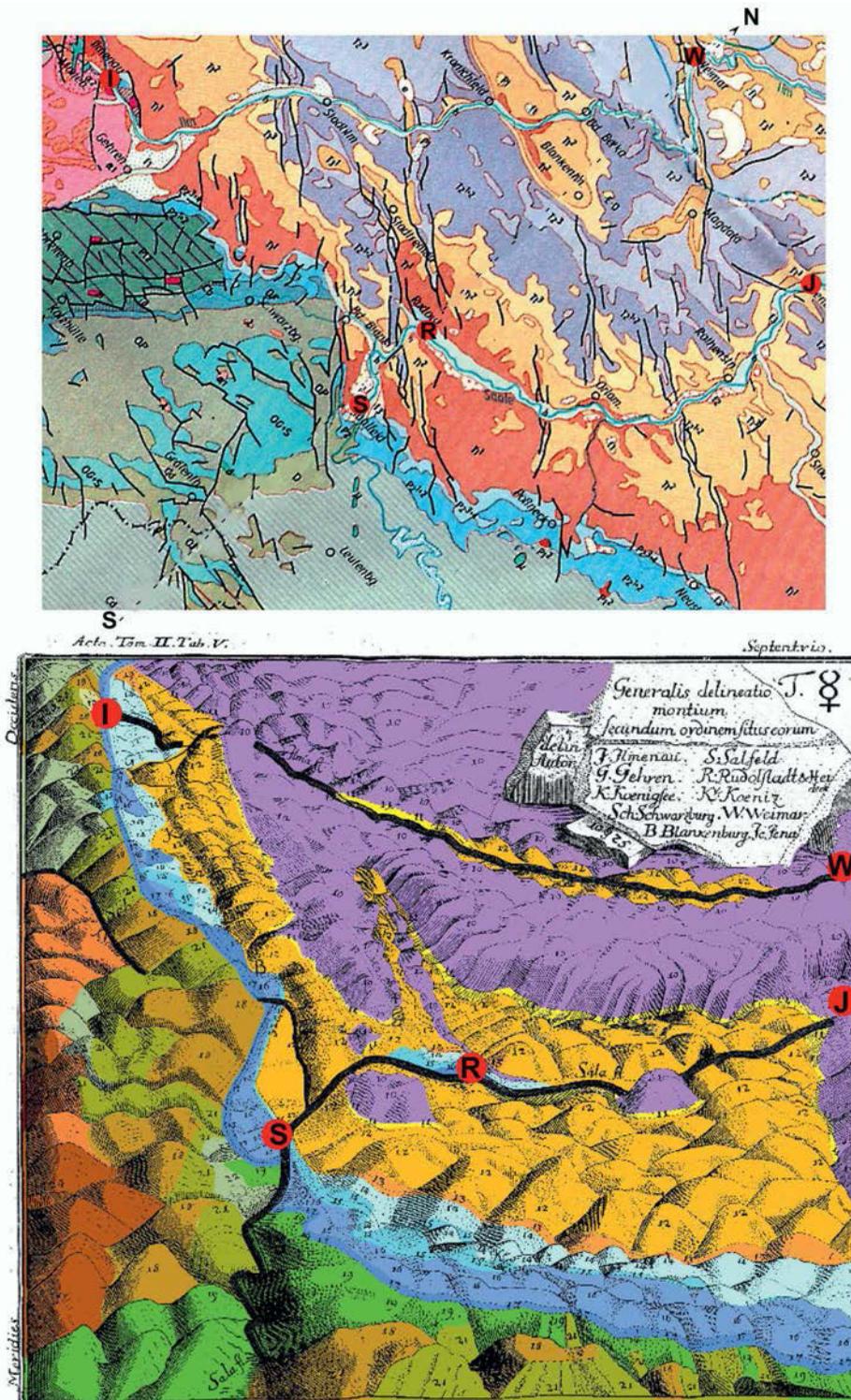


Abb. 1: Der Vergleich von Fuchsel's Karte von 1761 mit einer modernen geologischen Karte (SEIDEL 1972) zeigt die empirische Pionierleistung Fuchsel's aufs deutlichste, wenn Fuchsel's Zahlencode von 10 bis 25 für seine stratigraphischen Einheiten in einen Farbcode übertragen wird, der den heutigen Symbolfarben entspricht. I = Ilmenau, W = Weimar, J = Jena, R = Rudolstadt; S = Saalfeld. Farbige Karte S. Rein.

Bindung, die bis zum Tod der Mutter bestand. Als sie 1738 mit dem Sattler Johann Albert Federly eine dritte Ehe einging, war Fuchsel 16 Jahre alt und seit seinem fünften Lebensjahr Schüler am Rudolstädter Gym-

nasium Fridericianum. Hier galt er bei seinen Lehrern mit seinem lebhaften Verhalten als ein unbequemer, aber auch hochintelligenter Schüler *mit denjenigen Geistesgaben ausgestattet, mit welchen nur sehr wenige versehen sind.* (MÖLLER 1963: 6). Über die Gründe, warum er erst 1741 als Neunzehnjähriger das Gymnasium verließ, kann nur spekuliert werden.

Dann studierte Fuchsel von 1741 bis 1744 in Jena Medizin und weitere drei Jahre an der größeren Universität Leipzig Naturwissenschaften und Theologie. Ohne akademischen Abschluss kam er 1747 nach Rudolstadt zurück. Augenscheinlich zielgerichtet begann Fuchsel hier mit der geologischen Feldforschung. Im Jahre 1749 ließ seine Mutter ihre Immobilie auf den Namen des Stiefvaters überschreiben und dem Sohn seinen Erbanspruch auszahlen (MÖLLER 1963: 5). Fortan führte Fuchsel seine Kartierungsarbeiten im Gelände auf eigene Kosten weiter und beendete sieben Jahre später die praktische Feldforschung.

Wahrscheinlich notgedrungen stellte er am 23. Mai 1756 beim Fürsten den Antrag auf Zulassung einer eigenen Arztpraxis. Diese erhielt er nach einer Prüfung durch den Leibarzt mit Einschränkungen bereits

vier Wochen später. Seine Patienten waren anfangs zum großen Teil die Armen der Stadt und obwohl er über keine praktische Erfahrung verfügte, wurde seine angewandte Medizin *sehr angerühmet* (MÖL-

LER 1963: 8). Zusätzlich übernahm er 1761 die Stelle des Waisenhausesarztes. Um *durch die Promotion dem Vorurtheile, daß ich mehr ein Mineralogus als ein Medico sey, abzuhelpfen* (MÖLLER 1963: 13), promovierte er im Juli 1762 an der medizinischen Fakultät der Universität Erfurt. Da inzwischen auch Hofbedienstete zu seinen Patienten gehörten, erhielt Füchsel 1767 den offiziellen Titel Hofmedicus (MÖLLER 1963: 14) und war damit finanziell abgesichert.



Abb. 2: Mit dem Stein aus thüringischem Muschelkalk wird auf Schloss Heidecksburg über Rudolstadt des Pioniers der Geologie gedacht. Foto H. Hagdorn 2013

Nach beendeter Feldforschung begann er neben seinen ärztlichen Verpflichtungen mit der Aufarbeitung seiner geologischen Erkenntnisse. Bei der Suche nach Diskussionspartnern nahm er zu der 1754 im Sinne der Aufklärung gegründeten Kurfürstlich-Mainzischen Akademie nützlicher Wissenschaften zu Erfurt Verbindungen auf. Hier fand er in dem gleichalterigen Professor der Philosophie und Medizin Christoph Andreas Mangold den gesuchten Korrespondenzpartner aus seiner *gelehrten Einöde* (MÖLLER 1963: 9) zum geistigen Bildungszentrum Erfurt. Doch auch am Rudolstädter Fürstenhof wusste man sein geologisches Wissen zu schätzen. Weil *Mineralogie das Lieblings-Fach dieses Mannes war* wurde Füchsel 1757 vom erkrankten Prinzen Friedrich Carl von Schwarzburg-Rudolstadt mehrmals als Lehrer zum *Unterricht in der Oryctologie und Geognosie* eingeladen. Bei dieser Gelegenheit sortierte und klassifizierte er *eine beträchtliche Anzahl von Vaterländischen Erz-Stuffen*, die später den Grundstein des weithin bekannten Rudolstädter Naturalienkabinetts bildeten (v. SCHWARZBURG-RUDOLSTADT 1790: 21).

Auf Bitte des Fürsten fertigte er 1760 ein Gutachten über eine *bey Königsee befindliche Berghöle* (MÖLLER 1963: 25). Die exzellente Arbeit ist die einzige erhalten gebliebene Handschrift Füchsels. Detailliert erläutert er darin die geologischen Verhältnisse des Rinnetals, erklärt die Entstehung der Klufthöhlen in den Riffkalken des Zechsteins und begründet dem Fürsten, warum das von den Stalaktiten tropfende Wasser keine heilkräftige Wirkung hat.

Von der Zusammenarbeit mit der Erfurter Akademie – er war seit dem 12. August 1760 ordentliches

Mitglied – hatte sich Füchsel viel erhofft. Die im Todesjahr seiner Mutter 1761 erschienene Publikation seiner Forschungsergebnisse (FÜCHSEL 1761) wurde jedoch zum Desaster. Das ursprünglich deutsch verfasste Manuskript wurde in ein mangelhaftes Latein übertragen und damit nahezu unverständlich. Sein Lebenswerk blieb folglich für die Allgemeinheit faktisch unbeachtet.

Ähnlich enttäuschend erging es ihm mit einer von der Akademie angeregten Kartierung der Besitzungen des Erzstifts Mainz um Erfurt. Füchsel übergab das Manuskript seiner letzten geologischen Feldarbeit am 30. Juli 1762 alsbald dem Kanzler der Akademie (MÖLLER 1963: 11). Seine Aufzeichnung wurde jedoch zugunsten einer bereits vorgefertigten konservativen Arbeit des Professors Johann Wilhelm Baumer einfach ignoriert (BAUMER 1763). Füchsel publizierte seinen Entwurf schließlich 1766 in Leipzig unter dem Titel *Ansicht des Erfurthischen Gebietes als eines Theils von Thüringen*. Sein Bericht entspricht der Erläuterung einer geologischen Karte im heutigen Sinne. Darin äußert er auch den Wunsch, geologische Karten farbig darstellen zu können (FÜCHSEL 1766: 376) und denkt bereits an eine verbesserte *Historia* in deutscher Sprache: *Sollten mir künftig Gesundheit, Muße und günstige Gelegenheiten erlauben, die itzt gedachte historiam nach meinem deutsch umzuarbeiten, so hoffe ich so wohl den Mängeln, welche der enge Raum damals verursachte, als auch andern Undeutlichkeiten abzuhelpfen, dadurch aber meinem Leser eine noch mehr gegründete Einsicht in die Erdgeschichte zu verschaffen und deren nützliche Anwendung weiter an die Hand zu geben.* (FÜCHSEL 1766: 390). Überraschend

meldete sich doch ein Leser seiner *Historia*. Mit dem jungen Horace Benedict de Saussure, Professor an der Universität Genf, kam es zu einem Schriftwechsel (v. SCHWARZBURG-RUDOLSTADT 1790: 22). Die späteren Arbeiten de Saussures zeigen aber, dass auch er Fuchsel's Lebenswerk nicht verstanden hatte (FRESHFIELD & MONTAGNIER 1920). Nach seiner letzten geologischen Feldarbeit 1762 entwickelte Fuchsel eine eigene philosophische Sicht der Dinge. Indem er seine Erkenntnis der Erdgeschichte im Kontext der Geschichte unseres Sonnensystems und dieses wiederum als Teil des Universums betrachtete, erahnte er die Unermesslichkeit von Zeit und Raum.

Georg Christian Fuchsel starb unverstanden am 20. Juni 1773 im Elternhaus, in dem er 43 Jahre bescheiden gelebt und gearbeitet hatte. Ein Portrait von ihm ist nicht bekannt. Fuchsel's Leben und Werk wurden von MÖLLER (1963), WIEFEL (1989), RAHDEN (1992) und REIN (2009) dargestellt.

Schriftenverzeichnis

- ALBERTI, F. v. (1834): Beitrag zu einer Monographie des Bunten Sandsteins, Muschelkalks und Keupers, und die Verbindung dieser Gebilde zu einer Formation. – 366 S.; Stuttgart (Cotta) [Reprographischer Nachdruck. Mit einem Vorwort des Herausgebers und einem biographischen Essay von W. HANSCH, 366+47 S.; Ingelfingen (1998)].
- BAUMER, J. B. (1763): Naturgeschichte des Mineralreichs mit besonderer Anwendung auf Thüringen. – 2 Teile, 520, 318 S.; Gotha (J. Ch. Dieterich).
- BENECKE, E. W. (1877): Über die Trias in Elsass-Lothringen und Luxemburg. – Abhandlungen zur geologischen Spezialkarte von Elsass-Lothringen, 1: 490-829; Straßburg.
- FREYBERG, B. v. (1932): Die geologische Erforschung Thüringens in älterer Zeit. Ein Beitrag zur Geschichte der Geologie bis zum Jahre 1843. – 160 S.; Berlin (Borntraeger).
- FREYBERG, B. v. (1955): Johann Gottlob Lehmann (1719–1767). Ein Arzt, Chemiker, Metallurg, Bergmann, Mineraloge und grundlegender Geologe. – Erlanger Forschungen, B 1: 1-159; Erlangen.
- FRESHFIELD, W. D. & MONTAGNIER, H. F. (1920): The life of Horace Benedict de Saussure. – 480 S., London (E. Arnold).
- FÜCHSEL, G. C. (1761a): Historia terrae et maris, ex historia Thuringiae, per montium descriptionem, eruta. – Acta Academiae electoralis Moguntinae, 2: 44-254, Erfurt.
- FÜCHSEL, G. C. (1761b): Usus historiae suae terrae et maris. – Acta Academiae electoralis Moguntinae, 2: 209-254; Erfurt.
- FÜCHSEL, G. C. (1766): Ansicht des Erfurthischen Gebietes als eines Theils von Thüringen. – Neue oekonomische Nachrichten, 3: 359-390; Leipzig (C. Fritsch).
- ANONYMUS [FÜCHSEL, G. C.] (1773): Entwurf zu der ältesten Erd- und Menschengeschichte nebst einem Versuch den Ursprung der Sprache zu finden. – 270 S. Frankfurt und Leipzig.
- HAGDORN, H. & NITSCH, E. (1999): Zum Begriff »Trias« – Ein geschichtlicher Abriss. – In: HAUSCHKE, N. & WILDE, V. (Hrsg.), Trias, eine ganz andere Welt: Mitteleuropa im frühen Erdmittelalter: 13-21; München (Pfeil).
- KEFERSTEIN, C. (1840): Geschichte und Litteratur der Geognosie. – 281 S.; Halle (F. Lippert).
- LEHMANN, J. G. (1756): Versuch einer Geschichte von Flötzgebürgen, betreffend deren Entstehung, Lage, darinne befindliche Metallen, Mineralien und Fossilien, grösstentheils aus eigenen Wahrnehmungen, chymischen und physikalischen Versuchen, und aus denen Grundsätzen der Natur-Lehre hergeleitet, und mit nöthigen Kupfern versehen. – 240 S.; Berlin (Klüttersche Buchhandlung).
- LUCAS, S. G. (2010): The Triassic timescale: an introduction. – In: LUCAS, S. G. (ed.), The Triassic Timescale, 1-16; London (Geological Society).
- MÖLLER, R. (1963): Mitteilungen zur Biographie Georg Christian Fuchsel's. – Freiburger Forschungshefte, D 43, 1-29; Leipzig.
- NITSCH, E. (1996): Keuper 1820–1834: Geburt eines stratigraphischen Begriffes. – Annales Scientiae, 53: 489-500; London.
- RAHDEN, W. V. (1992): Ein fast vergessener Aktualist: Georg Christian Fuchsel zu Ursprung und Entwicklung der Erde und der Sprache. – In: NAUMANN, B. PLANK, E., HOFBAUER, G. (eds.), Language and Earth, 289-322; Amsterdam/Philadelphia.
- REIN, S. (2009): Georg Christian Fuchsel (1722–1773) – ein Aktualist entdeckt die Tiefenzeit der Erdgeschichte. – Vernate, 28: 11-30; Erfurt.
- SCHWARZBURG RUDOLSTADT, F. C. v. (1790): Privat Nachrichten. – In: MEY, E. (2008): Aus den frühen Jahren des Naturhistorischen Museums Rudolstadt in Thüringen. Rudolstädter Naturhistorische Schriften, Supplement 7; 47 S.
- SEIDEL, G. (1972): Geologische Karte von Thüringen, 1: 500 000, Beilage zu: Das Thüringer Becken – Geologische Exkursionen. – Geographische Bausteine, Neue Reihe, 11, 99 S.; Gotha/Leipzig (H. Haack).
- WIEFEL, H. (1999): GEORG CHRISTIAN FÜCHSEL (1722–1773) – Seine Verdienste um die frühe Triasforschung. – In: HAUSCHKE, N. & WILDE, V. (Hrsg.), Trias, eine ganz andere Welt: Mitteleuropa im frühen Erdmittelalter: 577-580; München (Pfeil).
- ZITTEL, K. A. v. (1899): Geschichte der Geologie und Paläontologie bis Ende des 19. Jahrhunderts. – Geschichte der Wissenschaften in Deutschland, Neuere Zeit, Band 23: 868 S.; München (Oldenbourg).

Archivalien

FÜCHSEL, G. C. (1760): Gutachten über eine bey Königsee befindliche Berghöle. – Urkunde, Archiv Rudolstadt.

Manuskript eingegangen: 17.03.2015

Annahme zur Veröffentlichung: 06.01.2016

HAGDORN, H., SIMON, T. (2020): Grundlagen und Methodik der stratigraphischen Beschreibung der Muschelkalk-Gruppe in Deutschland. – In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Koordination und Redaktion: HAGDORN, H., SIMON, T., für die Subkommission Perm-Trias): Stratigraphie von Deutschland XIII. Muschelkalk. – Schriftenr. Dt. Ges. Geowiss., 91: S. 21-32; Berlin.

Grundlagen und Methodik der stratigraphischen Beschreibung der Muschelkalk-Gruppe in Deutschland

[Basics and methods of the stratigraphic subdivision of the Muschelkalk Group in Germany]

Hans Hagdorn¹ und Theo Simon²

¹ Muschelkalkmuseum, Schloss-Str. 11, D-74653 Ingelfingen, e-mail: encrinus@hagdorn-ingelfingen.de

² Gehrendshalde 42, D-74427 Fichtenberg, (zuvor LGRB Baden-Württemberg), e-mail: simon-fichtenberg@gmx.de

Kurzfassung

Grundlagen und Methodik der stratigraphischen Gliederung des Muschelkalks in Deutschland werden dargelegt, wie sie durch die AG Muschelkalk in der Subkommission Perm-Trias (SKPT) der Deutschen Stratigraphischen Kommission (DSK) erarbeitet wurden. Dabei ist eine einheitliche Nomenklatur angestrebt, welche die Regeln des International Stratigraphic Guide beachtet. Erhalten bleiben allgemein gebräuchliche und eindeutige Namen, während Synonyme und Homonyme weitgehend beseitigt werden. Im föderativen System der Geologischen Dienste ist eine völlige Vereinheitlichung von stratigraphischen Einheiten und Grenzziehungen derzeit noch nicht möglich. Methodisch und nomenklatorisch wird unterschieden zwischen Lithostratigraphie i.e.S. (Gruppe, Subgruppe, Formation, Subformation [engl. member]), Leitflächenstratigraphie (regionale Geochronologie, Folge, Subfolge), und Biostratigraphie (Zone). Für die stratigraphischen Einheiten wird ein hierarchisch aufgebautes System von Kürzeln vorgeschlagen. Schließlich werden die den Muschelkalk betreffenden Beschlüsse der SKPT seit 1991 im Wortlaut aufgeführt. Untergrenze und Obergrenze des Muschelkalks liegen gemäß den Beschlüssen an Leitflächen.

Abstract

Basics and methods of the stratigraphic subdivision of the Muschelkalk in Germany are explained according to the proposals and decisions of the Muschelkalk Workinggroup in the Permian-Triassic Subcommission (SKPT) of the German Stratigraphic Commission (DSK). It is aimed at a standardized terminology that considers the regulations of the International Stratigraphic Guide. Generally accepted and well defined stratigraphic terms are conserved but synonyms and homonyms are replaced to a large extent. However, a complete standardisation of stratigraphic units and boundaries is not yet possible because in many cases

historical terminologies of the federally organized geological services in Germany had to be considered. In methods and terminology it is distinguished between lithostratigraphy *sensu stricto* (group, subgroup, formation, subformation [= member]), disconformity and marker bed bounded allostratigraphy (regional geochronology, Folge, Subfolge), and biostratigraphy (Zone). A hierarchically constructed identification code of acronyms for the stratigraphic units is proposed. Moreover, the decisions of the SKPT concerning the Muschelkalk since 1991 are reported. According to these decisions, the lower and upper boundaries of the Muschelkalk have been drawn at marker horizons.

Schlüsselwörter: Stratigraphie, Muschelkalk, Kommissionsbeschlüsse, Richtlinien, stratigraphische Terminologie

Keywords: stratigraphy, Muschelkalk, decisions of commissions, regulations, stratigraphic terminology

1. Grundlagen

Die stratigraphische Erforschung des Muschelkalks begann im 18. Jahrhundert mit der Beschreibung und Abgrenzung von Gesteinsabfolgen gemäß ihrer lithologischen Kennzeichen. Deren Lagebeziehungen und insbesondere deren Altersstellung waren zunächst weitgehend unbekannt und wurden erst nach einem langen Prozess wissenschaftlicher Forschung und Auseinandersetzung geklärt (Kap. 2.1). Dennoch sind bis heute Fragen offen geblieben. Die zur Kennzeichnung der Gesteinskörper verwendeten Begriffe sind Grundbestandteile der Muschelkalk-Lithostratigraphie. In der Regel setzten sie sich aus einem Grundwort (z.B. Kalk, Oolith, Dolomit, Mergel, Sandstein oder dem informellen „Schichten“) und einem differenzierenden Bestimmungswort zusammen, ähneln also in gewisser Weise der binären zoologischen und botanischen Nomenklatur. Als Bestimmungswörter dienen:

- Geographische Namen, die adjektivisch (z. B. Marbacher Oolith, Hassmersheimer Mergel, Gogoliner Schichten) oder substantivisch (z.B. Kalkstein von Friedrichshall) gebraucht werden und wurden
- Lagebeziehungen (Unter-, Mittel-, Ober-, Liegend-, Hangend-, Zwischen-, Basal-, Grenz-)
- Reihenfolge (1, 2, 3 usw., a, b, c usw.)
- lithologische Merkmale (z.B. Wellenkalk, Tonplatten, Plattenkalke, Schaumkalk, Bändersalz)
- charakteristische und häufige Fossilien (z.B. Striatkalk, Trigonodusdolomit, Orbicularismergel, Trochitenkalk, Terebratelbank, Myophorienschichten, Fischschuppenschichten, Ceratitenschichten)

Der Fossilinhalt diente dabei überwiegend als lithologisches Merkmal.

Biostratigraphische Gliederungen in Zonen, wie sie für den Jura erstmals Albert Opper (OPPEL 1856–1858) aufstellte, wurden im Muschelkalk erst seit Beginn des 20. Jahrhunderts durchgeführt, als man den Leitwert der Ceratiten erkannte (PHILIPPI 1901, RIEDEL 1916; Kap. 4.2). Der Leitwert blieb jedoch noch lange Zeit umstritten oder weitgehend unbeachtet (WAGNER 1913, GWINNER 1970). Seit Ende der 1960er Jahre sind mit der Erforschung der Trias-Mikrofaunen neue biostratigraphische Indexformen hinzugekommen, insbesondere Conodonten und später Palynomorphe, die nicht nur neue biostratigraphische Gliederungen erlaubten, sondern auch die Korrelierung des Muschelkalks mit der tethyalen Mitteltrias präzisierten (KOZUR 1974a, b, 1975; Kap. 4.3 und 4.10).

Bereits in der Pionierzeit der Muschelkalkstratigraphie in den 1830er Jahren hatte man erkannt (z.B. ZENKER 1836), dass bestimmte Bänke durch bestimmte Fossilien oder Sedimentstrukturen gekennzeichnet sind und sich über mehr oder weniger weite Distanzen von Aufschluss zu Aufschluss wiedererkennen und durchverfolgen lassen. Zu dieser Erkenntnis führten großartige natürliche Aufschlüsse wie die kahlen Steilhänge im Unteren Muschelkalk der Umgebung von Jena, an denen sich die „Leitbänke“ über Kilometer entlang dem Saaletal hinziehen. Diese Leitbänke erkannte man auch in entfernteren Aufschlüssen wieder, lernte sie zueinander in Beziehung zu setzen und gliederte die ganze Schichtenfolge Abschnitt für Abschnitt durch die Lagebeziehungen zu diesen Leithorizonten. Die daraus entstandene Leitbankstratigraphie (Kap. 5.1) wurde in der Folgezeit immer weiter verfeinert und bildete bald das Gerüst der Gliederungen des Unteren Muschelkalks in Mitteldeutschland (FRANTZEN 1888, 1889) und des Oberen Muschelkalks in Süddeutschland (WAGNER 1913). Lithostratigraphische Einheiten

im engeren Sinn wurden dann zunehmend durch die Schichtenfolgen zwischen den Leitbänken – unabhängig von deren fazieller Ausbildung – definiert, weniger durch ihre Lithologie bzw. durch erkennbare lithologische Grenzen. Je dichter das System der Leitbänke wurde, in denen man Zeitmarken erkannt hatte, desto seltener hat man lithostratigraphische Einheiten beschrieben, also Lithofazies-Einheiten im strikten Sinn des International Stratigraphic Guide (INTERNATIONAL STRATIGRAPHIC GUIDE (ISG), HEDBERG 1976, SALVADOR 1994). In der Stratigraphie des Muschelkalks und der gesamten Germanischen Trias war damit ein Sonderweg beschritten, der neben Lithostratigraphie und Biostratigraphie eine Allostratigraphie im Sinn des NORTH AMERICAN STRATIGRAPHIC GUIDE von 1983 etablierte. Sie ermöglichte eine exakte Gliederung und ist im Muschelkalk hinsichtlich des zeitlichen Vorher und Nachher allen bekannten biostratigraphischen Gliederungen überlegen. Seither ist es üblich, eine stratigraphische Position in einer Schichtenfolge mit metrischer Angabe auf die nächste Leitbank zu beziehen. So werden in gut geführten Sammlungen dem anstehenden Gestein entnommene Fossilien – selbst biostratigraphische Indexfossilien wie Ceratiten – z.B. wie folgt beschriftet: „1,2 m unter der Spiriferinabank“ oder „30 cm über Basis von Tonsteinhorizont 4“.

Aus der Lithostratigraphie entwickelte sich seit den 1960er Jahren im Muschelkalk die Zyklustratigraphie, die in den Leitbänken ideale Bezugshorizonte fand (Kap. 6.1). Wenngleich die bisherigen zyklustratigraphischen Gliederungen sich noch weitgehend darauf beschränkten, die bereits etablierte Leitbank-Abfolge hinsichtlich ihrer Prozessabfolge zu interpretieren, sind für die Zukunft von dieser Seite auch Korrelationsmöglichkeiten über die Verbreitung der Leitbänke hinaus zu erwarten.

Im 19. Jahrhundert wurden – dem allgemeinen stratigraphischen Gebrauch entsprechend – lithostratigraphische Einheiten noch relativ häufig nach Lokalitäten benannt (z.B. Chorzower Schichten, Mikultschützer Schichten, Marbacher Oolith). Die von ECK (1865) für den oberschlesischen Muschelkalk auf diese Weise begonnene und von ASSMANN (1944) weitergeführte lithostratigraphische Gliederung in „Schichten“, was dem heute international üblichen Begriff der Formation entspricht, wurde nach 1945 in Polen beibehalten (Kap. 10.5). Nur in Ansätzen ausgeführt, wenngleich möglich, ist auch dort eine Gliederung durch Leitbänke. In den westdeutschen Bundesländern bevorzugte man in der leitbankstratigraphischen und lithostratigraphischen Tradition dagegen als Bestimmungswörter statt Ortsnamen zunehmend Ordnungsbegriffe, Fossilien und lithologische Bezeichnungen. Deshalb war das Inventar an differenzierenden Bestimmungswörtern bald erschöpft,

zumal in der Germanischen Trias dieselben namengebenden Fossilien als Fazieszeiger in unterschiedlichen stratigraphischen Einheiten immer wieder auftreten. So entstanden in der stratigraphischen Nomenklatur zahlreiche Homonyme, z.B.

Myophorienschichten

- im Buntsandstein (marine, karbonatische Tonplatenfazies des Röt (jetzt: Dornburg-Subformation))
- im Mittleren Muschelkalk (später Orbicularisschichten genannt; jetzt: Teil der Karlstadt-Formation)
- im Oberen Muschelkalk Frankens (jetzt: Hassmersheim-Subformation)
- im Gipskeuper (Playasedimente über dem Grundgips in Franken (jetzt: Teil der Grabfeld-Formation))

Oberer Trochitenkalk

- im Weserbergland Crinoidenkalke der *robustus*- bis *evolutus*-Zone (jetzt: Willebadessen-Subformation)
- im Meißnergebiet Crinoidenkalke der basalen *atavus*-Zone (jetzt: Erkerode-Subformation)
- in Baden-Württemberg Blaukalke mit Trochitenbänken von der *pulcher*- bis zur *evolutus*-Zone (jetzt: Bauland-Subformation)

Zusätzlich belastet wurde die Verständlichkeit und die Literatur noch dadurch, dass manche Begriffe einerseits als lithologische Bezeichnungen, andererseits auch für lithostratigraphische Einheiten verwendet wurden, z.B.

Schaumkalk

- oolithisches Gestein mit schaumiger Textur (durch Lösung der Ooide)
- oberer Teil des Unteren Muschelkalks in Brandenburg (jetzt: Rüdersdorf-Formation)

Wellenkalk

- dünnschichtig-flaserige Mergelkalke des Unteren Muschelkalks
- Unterer Muschelkalk (jetzt: Jena-Formation)
- unterer Abschnitt des Unteren Muschelkalks in Brandenburg
- Bankfolge in der Trochitenkalk-Formation in Baden-Württemberg

Zu einer Vermischung der stratigraphischen Systeme führte schließlich der Gebrauch des Begriffs Ceratitenschichten, der einerseits im Sinne einer lithostratigraphischen Einheit mit diachroner Untergrenze (je nach Obergrenze des Trochitenkalks), andererseits als eine biostratigraphische Einheit, nämlich der *flexuosus*-Zone bis *semipartitus*-Zone (Kap. 4.2), verwendet wurde. Und auch die Begriffe Nodosusschichten bzw. Nodosenschichten (= Schichten zwischen Spiriferi-

nabank und Hauptterebratelbank) und Semipartitusschichten (= Hauptterebratelbank bis Grenzbonebed) wurden in Baden-Württemberg und Bayern noch bis vor kurzem als lithostratigraphische Einheiten verwendet, die jedoch im stratigraphischen Umfang von dem der gleichnamigen Ceratitenzonen abweichen.

Diese Beispiele zeigen, dass in der Lithostratigraphie des Muschelkalks methodisch nicht klar getrennt wurde zwischen lithofaziell definierten Einheiten und solchen Einheiten, die von Leitbänken begrenzt sind und die damit einem anderen Stratigraphie-System angehören, das der Allostratigraphie des NORTH AMERICAN STRATIGRAPHIC GUIDE VON 1983 näher steht. Dort wurden *allogroup*, *alloformation*, *allomember* zur Kennzeichnung von *allostratigraphic units* verwendet, die durch Diskordanzen (*unconformities*) begrenzt sind. Die letzte Ausgabe des International Stratigraphic Guide (SALVADOR 1994) schlägt dafür den Begriff der *unconformity-bounded units* vor, die mit dem Grundwort *Synthem* bzw. *Subsynthem* etc. gekennzeichnet werden sollen. Die Leitbänke des Muschelkalks, welche Ereignisse (*events*) von zum Teil beckenweiter Reichweite dokumentieren, sind als hochauflösende Zeitmarken anerkannt und als solche selbst den genauesten biostratigraphischen Zonierungen überlegen. Wie weiter unten gezeigt wird, sind die Leitbänke annähernd isochron (quasi-isochron). Was zwischen zwei Leitbänken liegt, ist folglich die Gesteinsfüllung eines Zeitabschnitts, der von Region zu Region lithofaziell unterschiedlich ausgebildet sein kann oder auch leer ist, wo keine Ablagerung stattfand oder wo Gesteine wieder abgetragen wurden (Schichtausfälle). Nach dem Konzept der SKPT werden diese Zeitabschnitte als Folgen bezeichnet (Kap. 5.1). Einige Leitbänke lassen sich über Hunderte von Kilometern verfolgen, wengleich oft bei lateral wechselnder Fazies (Kap. 6.2). Das Verhältnis von Lithostratigraphie *sensu stricto* und Leitbank- bzw. Leitflächenstratigraphie wurde von LUTZ et al. (2005) detailliert dargelegt.

Allostratigraphische Einheiten sind z.B. mo1, mo2 und mo3 *sensu* KOZUR (1974a), die durch die Leitbänke Spiriferinabank, Cycloidesbank und das Grenzbonebed begrenzt sind, oder die traditionellen Einheiten des Unteren Muschelkalks in Mitteldeutschland, welche durch die fast beckenweit verbreiteten Oolithbänke, Terebratelbänke und Schaumkalkbänke begrenzt sind.

Lithostratigraphische Faziesseinheiten per definitionem sind dagegen im Unteren Muschelkalk der Rüdersdorfer Schaumkalk (Rüdersdorf-Formation) oder der Muschelsandstein am westlichen Beckenrand (Udfangen-Formation), im Oberen Muschelkalk der fränkische Quaderkalk (Quaderkalk-Formation) oder der Trigonodusdolomit (Rottweil-Formation). Deren Begrenzung ist nicht an eine Leitbank gebunden, son-

dern an einen Fazieswechsel und erfolgt daher regional in unterschiedlichen Niveaus; Formationsgrenzen können daher diachron sein. Manche dieser Einheiten wurden bereits in der Vergangenheit als Faziesräume beschrieben, so z.B. die Freudenstädter Fazies des Unteren Muschelkalks (VOLLRATH 1923; jetzt: Freudenstadt-Formation) oder der Trigonodusdolomit (jetzt: Rottweil-Formation). Andererseits zeigen die vielen, z. T. umständlichen, weil rein beschreibenden Benennungen der tonig-dolomitischen Warburg-Formation im Oberen Muschelkalk Nordwestdeutschlands, wie schwer man sich mit der Aufstellung lithostratigraphisch definierter Einheiten getan hat (Kap. 8.4).

In dem seit Beginn der geologischen Forschung föderativ strukturierten Deutschland konnte sich eine einheitliche stratigraphische Nomenklatur im Muschelkalk – wie auch in anderen stratigraphischen Einheiten – nicht entwickeln, denn von Geltungsbereich zu Geltungsbereich einzelner geologischer Landesdienste, also jenseits von Ländergrenzen, wurden identische Einheiten häufig unterschiedlich benannt. Solche Synonyme sind beispielsweise in der Leitbankstratigraphie des Oberen Muschelkalks die Trochitenbank 4 der baden-württembergischen Gliederung und die Terebrateldickbank in Bayern, oder die Albertiibank des Weserberglands und die Glaukonitkalkbank Thüringens. Das Ausmaß der Unübersichtlichkeit in der Terminologie, das besonders bei länderüberschreitenden Kartenblättern deutlich wird, zeigen die Korrelationstabellen in HAGDORN et al. (1987, 1993) bzw. HAGDORN & SIMON (1997). Noch weniger einheitlich ist die Symbolgebung für die einzelnen Einheiten, wie sie auch in den amtlichen geologischen Karten Verwendung findet, so dass es ohne Spezialkenntnisse beim Schichtenvergleich zu Irrtümern kommen kann (vgl. Verzeichnis 13.3).

Die Uneinheitlichkeit der Symbolgebung konnte bis heute durch den Gebrauch digitaler Schichtdatenverarbeitung in Datenbanken nicht völlig behoben werden. Dieselben Einheiten – selbst wenn sie in der ausgeschriebenen Bezeichnung noch gleich benannt sind – werden in den Symbolschlüsseln benachbarter Länder z. T. unterschiedlich abgekürzt und können somit nicht direkt verglichen werden. Wir schlagen deshalb hier für die lithostratigraphischen Einheiten ein hierarchisch aufgebautes System von Kürzeln vor (s.u.). Die Kürzel in dem unter einigen Ländern abgestimmten Symbolschlüssel (LBEG 2015) entsprechen nur für Gruppe, Subgruppen, die meisten Formationen und die Folgen dem hier vorgeschlagenen System. So ist im Symbolschlüssel LBEG 2015 die Zuordnung von Subformationen und Bänken zu den nächsthöheren Einheiten nicht ersichtlich. Die Kürzel für die Ceratitenzonen folgen weitgehend LBEG 2015,

doch sind die Abkürzungen für die Zonenceratiten kleingeschrieben, um diese Kürzel klar von Kürzeln für lithostratigraphische Einheiten zu unterscheiden (Kap. 4.2).

Das besondere Problem der bisherigen Muschelkalk-Lithostratigraphie steckt deshalb in einer für den Außenstehenden schwer überblickbaren Vielfalt von Namen und Symbolen. Darin spiegelt sich einerseits die außergewöhnlich präzise Regionalbearbeitung, andererseits aber auch die bislang unzureichende Klärung von Synonymen und Homonymen in unterschiedlichen Gebieten, welche die Nomenklatur belasten. Der heutige Stand der Muschelkalk-Nomenklatur lässt sich wie folgt kennzeichnen: Es gibt eine Vielzahl gut bearbeiteter und regional gültiger Lokalgliederungen mit minutiös bearbeiteten Profilen, die der starken Faziesdifferenzierung gerecht werden, aber methodisch oft nicht genau zwischen Leitbankstratigraphie und Lithostratigraphie *sensu stricto* unterscheiden. Was bislang fehlte, ist die synoptische Übersicht mit einer allgemein akzeptierten, unmissverständlichen Nomenklatur aus einem Guss, die Gleiches gleich und Unterschiedliches unterschiedlich benennt. Eine solche Gliederung muss Biostratigraphie, Lithostratigraphie, Leitbankstratigraphie und natürlich auch Zyκλοstratigraphie, Sequenzstratigraphie und Magnetostratigraphie methodisch getrennt halten, wengleich all diese Methoden zusammen die Genese eines Schichtenabschnitts in Raum und Zeit besser verstehen lassen.

Ein verbindlicher lithostratigraphischer Standard für den Muschelkalk wurde in der STRATIGRAPHISCHEN SKALA DER DDR für die TRIAS im Jahr 1974 (TGL 25234/11) vorgelegt. Diese Gliederung ist überwiegend leitbankstratigraphisch ausgerichtet. Eine terminologische und methodische „Flurbereinigung“ für den Muschelkalk im wiedervereinigten Deutschland bedurfte neben der Fachkompetenz und länder-überschreitenden Geländekenntnis und Methodensicherheit auch der autoritativen Kraft, wie sie von der Perm/Trias-Subkommission in der Deutschen Stratigraphischen Kommission ausgeht.

Mit der in diesem Band vorgelegten, den gesamten Muschelkalk in seiner zeitlichen und räumlichen Erstreckung auf deutschem Staatsgebiet lückenlos abdeckenden Gliederung in Formationen, wird das System der lithostratigraphischen Einheiten zwischen den Hierarchieebenen Bank und Gruppe komplettiert. Ein solches lag bisher nur in Ansätzen und in heterogener Benennung und Bewertung vor. Dabei fasst die vorliegende „Muschelkalk-Synopsis“ den Wissensstand in standardisierter Übersicht zusammen und ergänzt ihn um viele aus den Geländearbeiten gewonnene neue Erkenntnisse. Die methodische Trennung nach

Biostratigraphie, Leitbankstratigraphie (Allostratigraphie), Lithostratigraphie, Zyklus- und Sequenzstratigraphie sowie Magnetostratigraphie, die sich auch in der Terminologie und in den Kürzeln niederschlägt, gewährleistet eine weitgehend kohärente und einheitliche Darstellung des Muschelkalks in Deutschland. Allerdings ließen sich nicht alle Wünsche nach Vereinheitlichung verwirklichen. Die Regionalkapitel zeigen, dass Beharrlichkeit oder auch Unwille, sich von traditionellen Begriffen oder von regionalen Standards in der Nomenklatur und in den Symbolschlüsseln zu trennen, nicht zu unterschätzen sind. Hier kann nur darauf gehofft werden, dass eine spätere Bearbeitung zu einer weitergehenden Vereinheitlichung der Nomenklatur führt.

Die Abschnitte über die Muschelkalk-Stratigraphie in den Nachbarstaaten (Kap. 10) zeigen, dass der Korrelation über Grenzen hinweg allenfalls untergeordnete Hindernisse entgegenstehen. Neben der Biostratigraphie ermöglicht besonders die Leitbankstratigraphie den direkten Vergleich von Schichtenfolgen innerhalb des Mitteleuropäischen Beckens über die Grenzen Deutschlands hinaus.

Die vorliegende Neugliederung gewährleistet die Beibehaltung der in ihrer Auflösung unerreichten Leitbankstratigraphie, die mit einer konsequenten Neubearbeitung der Lithostratigraphie *sensu stricto* nicht entwertet oder gar aufgegeben wird. Vielmehr erleichtern die standardisierten Texte mit ihren Querverbindungen zu anderen stratigraphischen Methoden eine optimale Gliederung des Muschelkalks und ein vertieftes Verständnis der Ablagerungsdynamik. Der germanische Muschelkalk lässt sich damit in exemplarischer Weise in einer Genauigkeit und Methodenvielfalt gliedern, wie das in anderen epikontinentalen Sedimentbecken kaum möglich ist. Diese Datenfülle spiegelt ein Vierteljahrtausend stratigraphischer und paläontologischer Forschung wider, seit Georg Christian Füchsel vor über 250 Jahren (FÜCSEL 1761) den Begriff *Muschelkalk* geprägt hat. Mit dem Entwurf einer hier erstmals konsequent und einheitlich durchgeführten lithostratigraphischen Gliederung des Muschelkalks in Deutschland wurde gleichzeitig der Anschluss an den internationalen Standard und die international gebräuchliche Terminologie gefunden, für die Beschlüsse der SKPT grundlegend waren. Die biostratigraphischen Daten bieten darüber hinaus Hilfe für die Korrelierung mit den Schichtenfolgen der tethyalen Trias. Die Differenzierung in Lithostratigraphie und Leitbankstratigraphie hebt die besondere Bedeutung der Leitbänke für die exakte Gliederung der marinen germanischen Mitteltrias hervor.

Auch die Ergebnisse der geophysikalischen Bohrlochmessungen und der mit Hilfe von Gammastrahl-Handsonden an Tagesaufschlüssen gewonnenen Daten (z. B. AIGNER et al. 1995) wurden in die Beschreibungen eingearbeitet. Das gilt auch für Ergebnisse von Faziesanalysen und Sequenzstratigraphie (z. B. AIGNER & BACHMANN 1992, SZULC 2000). Doch nur lithologische Wechsel oder im Gestein erkennbare Leitflächen können als gültige Abgrenzungskriterien gelten. Daher widerspricht es dem methodischen Konzept, lithostratigraphische Einheiten vor allem nach sequenzstratigraphischer Interpretation auszurichten. Insbesondere in den praktischen Anwendungen der Stratigraphie, bei der die in Karte oder Bohrprofil ausgewiesenen Einheiten nach ihren Eigenschaften bewertet werden sollen (z. B. Rohstoffrelevanz, Rutschungsneigung, Grundwasserführung, geogene Belastungen der Böden), ist nur eine nach dem Gesteinsbestand definierte Lithostratigraphie wirklich verwendbar. In den letzten 30 Jahren hat sich außerdem gezeigt, dass sequenzstratigraphische und verwandte Deutungen zu stark wissenschaftlichen Zeitströmungen ausgesetzt sind. Parasequenz- und auch Sequenzgrenzen müssen demnach nicht unbedingt identisch mit den Grenzen von Einheiten der hier behandelten deskriptiven Lithostratigraphie sein. Ein Blick auf die sequenzstratigraphischen Gliederungen der Germanischen Trias durch AIGNER & BACHMANN (1992) oder SZULC (2000) zeigt jedoch die Kongruenz vieler Grenzziehungen (vgl. Kap 6.1).

2. Der Muschelkalk in der Subkommission Perm-Trias (SKPT) der Deutschen Stratigraphischen Kommission (DSK)

Zu dem vorliegenden Band, der „Muschelkalk-Synopsis“, haben Geologen der Geologischen Dienste der Länder und des Bundes, von Universitätsinstituten, Forschungsinstituten und Naturkundemuseen, aber auch spezialisierte Privatforscher über drei Jahrzehnte ihre Kenntnisse und Erfahrungen beigegeben. Diese werden seit 1988 in der Subkommission Perm-Trias (SKPT) der Deutschen Stratigraphischen Kommission (DSK) gesammelt (SUBKOMMISSION PERM-TRIAS SKPT 2011). Dafür konstituierte sich im gleichen Jahr die Arbeitsgruppe Muschelkalk in der SKPT, die Manfred Horn vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie von 1988 bis zu seinem Tod 1999 koordinierte, seither Hans Hagdorn vom Muschelkalkmuseum Ingelfingen. Auf dem Weg bis zum Erscheinen der Muschelkalk-Synopsis wurde in oft äußerst engagierten Diskussionen um Methodik und Inhalte, Grenzziehungen und Definitionen gerungen. Jahre beanspruchte vor allem der Erkenntnisprozess, dass die lithostratigraphische Basiseinheit *Formati-*

on als einheitlicher Fazieskörper räumlich begrenzt ist und nicht notwendig beckenweit verbreitet sein muss. Diese Erkenntnis führte – aufbauend auf der traditionellen Bankstratigraphie – zur zusätzlichen Etablierung der allostratigraphischen Folgen, die nach unten und oben durch quasi-isochrone Leitflächen begrenzt und dabei durch verschiedene Lithologien gefüllt sein können (LUTZ et al. 2005, MENNING et al. 2005). Der Muschelkalk mit seinen zahlreichen Leitbänken trug entscheidend zu diesem Klärungsprozess bei, zumal hier zusätzlich eine hoch auflösende Biostratigraphie kontrollierend wirken konnte.

Über Organisationsstruktur, Beschlüsse, Arbeitsergebnisse und Aktivitäten der SKPT wird in ständig aktualisierter Form auf deren Webseite berichtet: <http://www.stratigraphie.de/perm-trias/>

Seit 1991 wurden von der AG Muschelkalk in die SKPT Anträge zur Abstimmung über die Formationen des Muschelkalks und über Grenzziehungen eingebracht. Im Folgenden seien die den Muschelkalk betreffenden Beschlüsse im Wortlaut referiert und mit den jeweiligen Abstimmungsergebnissen wiedergegeben (MENNING et al. 2011):

Rang: Beschluss Nr. 9, Römheld 15.05.1993, Antragsteller: Menning: „Die aufgeführten lithostratigraphischen Einheiten werden wie folgt klassifiziert:

Zechstein	Gruppe
Buntsandstein	Gruppe
Unterer, Mittlerer und Oberer Buntsandstein	Untergruppen
Muschelkalk	Gruppe
Unterer, Mittlerer und Oberer Muschelkalk	Untergruppen
Keuper	Gruppe
Unterer, Mittlerer und Oberer Keuper	Untergruppen

Untergrenze (Obergrenze Buntsandstein): Beschluss Nr. 3, Würzburg 04.05.1991, Antragsteller: AG Buntsandstein und AG Muschelkalk: „Die Arbeitsgruppen ... empfehlen, die Myophorien-Schichten als oberste stratigraphische Einheit im Röt zu belassen. In den Aufschlussgebieten von Süddeutschland, Unterfranken, Süd- und Osthessen, Südniedersachsen, Ostwestfalen, Thüringen und dem Harzvorland wird der **Grenzelkalk** (Gelbe Grenzbank) als Basishorizont des Unteren Muschelkalk definiert. Mit Hilfe von geophysikalischen Bohrlochmessungen in Tiefbohrungen ist eine Weiterverfolgung dieser Grenze im Norddeutschen Becken möglich.“

JA 10, NEIN 1

Obergrenze (Untergrenze Keuper): Beschluss Nr. 25, Gotha 19.07.1997, Antragsteller: Gremium: Die Muschelkalk/Keuper-Grenze [Muschelkalk-Keuper-Grenze] wird in Süddeutschland an die Basis des Muschelkalk/Keuper-Grenzbonebeds [**Muschelkalk-Keuper-Grenzbonebeds**] gelegt. Das Typusprofil ist im Schotterwerk Manger in Aub-Baldersheim.

JA 8, NEIN 1

Benennung: Beschluss Nr. 11, Krefeld 6.–8.05.1994, Antragsteller: AG Muschelkalk: „Die Subkommission Perm-Trias stimmt der Einführung der von HAGDORN, HORN & SIMON (1993) vorgeschlagenen Grundsätze zur Revision der lithostratigraphischen Nomenklatur und der entsprechenden Benennung der stratigraphischen Einheiten im Muschelkalk Deutschlands zu.“

JA 7, NEIN 1, Enth. 2

Benennung: Beschluss Nr. 19, Gotha 19.07.1997, Antragsteller: AG Muschelkalk: „Die SKPT stimmt dem Antrag der AG Muschelkalk zum **Unteren Muschelkalk** zu, wobei „Wellenkalk-Formation“ durch „Jena-Formation“ zu ersetzen ist. [Jena-Formation (Wellenkalk), Eschenbach-Formation, Freudenstadt-Formation (Plattendolomite bis Mittlere Mergel), Rüdersdorf-Formation (mächtige Schaumkalke und Bioklastkalke in Brandenburg), Udelfangen-Formation (Muschelsandstein)]“

JA 7, NEIN 1, Enth. 1

Benennung: Beschluss Nr. 20, Gotha 19.07.1997, Antragsteller: AG Muschelkalk: „Die SKPT stimmt dem Antrag der AG Muschelkalk zum **Mittleren Muschelkalk** zu. [Karlstadt-Formation (orbicularis-Mergel + Untere Dolomite, Dolomit 1, Untere Dolomitmergel), Heilbronn-Formation (Muschelkalk-Salinar), Diemel-Formation (Obere Dolomite, Obere Dolomitmergel), Grafenwöhr-Formation]“

JA 9

Benennung: Beschluss Nr. 23, Gotha 19.07.1997, Antragsteller: AG Muschelkalk: „Die SKPT stimmt dem Antrag der AG Muschelkalk zum **Oberen Muschelkalk** zu, davon ausgenommen sind Name und Klassifizierung der „Hohenlohe-Formation“. Die „Grafenwöhr-Formation“ reicht bis zum Grenzdolomit im Keuper. [Hohenlohe-Formation (nodosus-Schichten + semipartitus-Schichten), Trochitenkalk-Formation (Encrinus-Schichten, Trochitendolomit), Meißner-Formation [Ceratitenschichten (pars), Plattenkalke], Warburg-Formation (Lettenkeuperfazies des Oberen Muschelkalks, Dolomitische Grenzsichten, Toniige Grenzsichten, albertii-Schichten + ostracina-Schichten + Dolomitische Grenzsichten, Fischschuppenschichten + Glasplatten + Kastendolomite), Rottweil-Formation (Trigonodus-Dolomit), Irrel-Formation (Dolomite zwischen den Tonplattenschichten

und der Lettenkohle), Grafenwöhr-Formation (Muschelkalk in randnaher Ausbildung)]“

JA 7, NEIN 1, Enth. 1

Ralingen-Formation: Beschluss Nr. **56**, Weimar 30.04.2005, Antragsteller: AG Muschelkalk, Dittrich, Freudenberger, Hagdorn, Simon: „Die grauen und roten, teilweise feinsandigen Tonmergelsteine mit eingeschalteten Dolomit- und Sandsteinbänken und mit Kalziumsulfatgesteinen im oberen Abschnitt am westlichen Beckenrand (Rheinland-Pfalz, Saarland) werden als **Ralingen-Formation** (mmR) bezeichnet. Die Ralingen-Formation vertritt den mittleren und oberen Bereich der Karlstadt-Formation und die Heilbronn-Formation der Beckengliederung.“

JA 11, NEIN 2, Enth. 2

Schengen-Formation: Beschluss Nr. **57**, Weimar 30.04.2005, Antragsteller: AG Muschelkalk, Dittrich, Freudenberger, Hagdorn, Simon: „Die grauen und gelbgrauen, überwiegend dickbankigen und bioklastischen, teilweise oolithischen Dolomite der marinen Flachwasserfazies im Bereich der Siercker Schwelle (nordwestliches Saarland und westliches Rheinland-Pfalz) werden **Schengen-Formation** (moSc) genannt. Die Schengen-Formation vertritt im Schwellenbereich (nordwestliches Saarland) den gesamten Oberen Muschelkalk. Sie ist nach N in ihrem oberen Abschnitt verzahnt mit der Irrel-Formation, nach S und E in ihrem unteren Abschnitt mit der Trochitenkalk-Formation und in ihrem oberen Abschnitt mit der Meißner-Formation.“

JA 11, NEIN 2, Enth. 2

Gilsdorf-Formation: Beschluss Nr. **58**, Weimar 30.04.2005, Antragsteller: AG Muschelkalk, Dittrich, Freudenberger, Hagdorn, Simon: „Die ockerfarbenen und gelbgrünen oder -grauen, fein- bis mittelkörnigen plattigen Sandsteine und die teilweise bioklastischen, siltig-feinsandigen grauen oder mit rötlich-bunten Schlieren durchsetzten Dolomite mit marinen Faunen, die von Luxemburg her als feinklastische Ausläufer gerade noch auf deutsches Gebiet (Rheinland-Pfalz, westlichste Südeifel) hereinreichen, werden – wie neuerdings in Luxemburg üblich – als **Gilsdorf-Formation** (moGi) bezeichnet. Die Gilsdorf-Formation ist mit dem oberen Abschnitt der Irrel-Formation verzahnt.“

JA 11, NEIN 2, Enth. 2

Quaderkalk-Formation: Beschluss Nr. **59**, Weimar 30.04.2005, Antragsteller: AG Muschelkalk, Dittrich, Freudenberger, Hagdorn, Simon: „Die dickbankigen, hellgrauen, bioklastischen, z. T. oolithischen Kalksteine der vollmarinen Schwellenfazies des Oberen Muschelkalks in Franken zwischen Würzburg, Tauberbischofsheim und Rothenburg ob der Tauber werden als **Quaderkalk-Formation** (moQ) bezeichnet.“

JA 11, NEIN 2, Enth. 2

Vossenveld-Formation

Beschluss Nr. **63**, Windischeschenbach 06.05.2006, Antragsteller: AG Muschelkalk, Hagdorn, Farrenschon, Simon: „**Winterswijk-Formation** (Unterer Muschelkalk): In der nördlichen Umrandung des Rheinischen Massivs wird die Randfazies des Unteren Muschelkalks mit seiner Abfolge von rotbraunen dolomitischen, pedogenen Mergeln, grauen, bituminösen Mergeln, hellgrauen dolomitischen Laminiten mit Trockenrissen und Tetrapodenfährten, flachmarinen, bioturbaten plattigen und flaserigen dolomitischen Kalken mit dünnen Schilllagen als Winterswijk-Formation (muWi) bezeichnet.“

JA 13, Enth. 1

Beschluss Nr. **67**, Thallichtenberg 19.04.2008, Antragsteller: AG Muschelkalk: „Die Winterswijk-Formation (Unterer Muschelkalk-Subgruppe) wird in **Vossenveld-Formation** umbenannt.“

Begründung: Die Winterswijk-Formation wurde durch die Subkommission Perm-Trias eingeführt (Beschluss Nr. 63, Windischeschenbach, 06.05.06), doch muss dieser Name wegen Präokkupation durch ein gleichnamiges Member [Subformation] verworfen werden, nämlich das Winterswijk Member [Subformation] der Rupel Formation, Oligozän (lokale Untergliederung für die östlichen Niederlande, Achterhook und Twente; Van den Bosch et al. 1975, vgl. auch van Adrichem Boogaert & Kouwe 1997). Der Name geht auf die Ortschaft Vossenveld östlich der Stadt Winterswijk (Niederlande, Achterhoek) zurück, wo die Typokalität der Formation liegt. Typusprofil ist die Winterswijkse Steen- en Kalkgroeve der Ankerpoort Company Winterswijk (Niederlande), wo im Aufschlussbereich ca. 39 m der insgesamt ca. 80 m mächtigen Formation zugänglich sind und bleiben sollen.

JA 11

Beschluss Nr. **74**, Korbach 23.04.2016, Antragsteller: Friedlein, Geyer, Hagdorn, Nitsch, Simon: Die Subkommission Perm/Trias der DSK möge beschließen, dass die mögliche Reichweite der **Eschenbach-Formation** (sensu Hagdorn et al. 1993) zum Hangenden bis einschließlich Unterer Keuper erweitert wird (Folgen m1 bis k1).

JA 12

Beschluss Nr. **75**, Korbach 23.04.2016, Antragsteller: Friedlein, Geyer, Hagdorn, Nitsch, Simon: Die Subkommission Perm/Trias der DSK möge beschließen, dass die Reichweite der **Grafenwöhr-Formation** die gesamte Buntsandstein- und Muschelkalk-Gruppe umfasst und möglicherweise gebietsweise im Liegenden und Hangenden darüber hinaus reicht.

JA 12

Durch SKPT-Beschluss Nr. 3 wurde die Grenze Buntsandstein-Muschelkalk an die Basis des Grenzgelbkalks gelegt. Damit wurde diese Grenze nicht an die von Ost nach West zeitlich ansteigende Faziesgrenze von vollmarin nach eingeschränkt marin und stark terrestrisch beeinflusst gelegt, sondern nach allostratigraphischen Gesichtspunkten als eine „quasi-isochrone“ Zeitgrenze gezogen. Die karbonatischen Myophorienschichten (Dornburg-Subformation) mit marinen Muschelkalkfaunen wurden damit in den Buntsandstein gestellt. Dieser Beschluss entspricht der gleichfalls allostratigraphischen Festlegung der Muschelkalk-Obergrenze, nämlich an der Basis des Grenzbonebeds bzw. an der Basis des Sandsteins S1 (Beschluss Gotha 19.07.1997). Damit ist der Muschelkalk in Deutschland allostratigraphisch definiert. Er ist in die neun Folgen m1 bis m9, die regional lithologisch unterschiedlich gefüllt sind, gegliedert und unterscheidet sich damit von der strikt lithostratigraphischen Muschelkalk-Definition in Polen. Eingehend diskutiert wird die damit verbundene Problematik in Kap. 8.1.

3. Methodik und Beschreibungsgrundsätze

Biostratigraphie – Alle hier dargestellten Zonen werden nach der Nomenklatur von STEININGER & PILLER (1999) typologisch gekennzeichnet, nach einheitlichem Standard definiert und abgegrenzt und – soweit dies möglich ist – chronostratigraphisch eingestuft. Es wird nicht zwischen biostratigraphischer und biochronologischer Gliederung unterschieden. Auch werden für die Zonen keine Typusprofile definiert, zumal auch frühere Bearbeiter keine entsprechenden Festlegungen getroffen haben.

Kapitel 4 gibt einen Überblick zum Kenntnisstand über biostratigraphisch verwertbare Fossilgruppen und bestehende Zonierungen. Referiert wird zunächst über die von KOZUR (1974a, b) vorgeschlagene und seither von vielen Autoren übernommene Standardzonierung, in der neben Cephalopoden und Conodonten weitere Invertebratengruppen verwertet wurden (Kap. 4.1). Die Ceratitenzonierung folgt i. W. den Vorschlägen von HAGDORN & SIMON (1985) unter Berücksichtigung der Arbeiten von URLICHS (1993), REIN (2007) und OCKERT & REIN (2000). Hier hinzugefügt wird als früheste Ceratitenzone die *flexuosus*-Zone. Die Conodonten-Zonierung beruht auf KOZUR (1974a), doch werden Ergebnisse regionaler Bearbeitungen eingefügt, die eine genauere Eichung an der Ceratitenstratigraphie und der Leitbankstratigraphie erlauben. Die übrigen Zonierungen, z.B. nach Ostrakoden, nach Palynomorphen oder nach marinen Reptilien, erlauben keine vergleichbar hohen Auflösungen. Genauere Darstellung finden auch solche Invertebratengruppen,

die sich prinzipiell für biostratigraphische Aussagen eignen, für die aber bisher noch keine Zonierungen vorgeschlagen wurden.

Lithostratigraphie – Der Vorstand der DUGW hat 1976 für die hierarchische Gliederung lithostratigraphischer Einheiten in Anlehnung an den International Stratigraphic Guide (ISG; HEDBERG 1976) eine Terminologie beschlossen (CCSK/DUGW 1977). Darin wurde der Muschelkalk (m) als „Abteilung“, mo, mm, mu wurden als Gruppen (im Text nicht explizit, aber in Analogie zum Beispiel Buntsandstein) angesehen. Formationen sind aber in diesem Schema so wie heute abgegrenzt. Die Gruppen wurden durch den Beschluss Nr. 9 von 1993 (s.o.) revidiert. Demnach haben die größeren lithostratigraphischen Einheiten der drei Muschelkalk-Subgruppen den Rang von Formationen, die untergeordneten Einheiten den von Subformationen (dem Member im englischen Sprachraum entsprechend). Darunter folgt die Bank als kleinste lithostratigraphische Einheit. Entsprechende Empfehlungen geben STEININGER & PILLER (1999) für die Handhabung der stratigraphischen Nomenklatur nach der Neubearbeitung des ISG durch SALVADOR (1994). Zwischen Subformation und Bank kann als informelle Einheit bei Bedarf der Horizont eingeschaltet sein. Es ergibt sich demnach, an einem Beispiel erläutert, folgende Hierarchie:

Supergruppe **Germanische Trias**

Gruppe **Muschelkalk**

Subgruppe **Oberer Muschelkalk**

Formation **Trochitenkalk-Formation**

Subformation **Bauland-Subformation**

Horizont **Horizont der Wellenkalke**

Bank **Wellenkalkbank 1**

In Kapitel 8 werden die lithostratigraphischen Einheiten Gruppe bis Formation in Anordnung vom Älteren zum Jüngeren und von Norden nach Süden nach einheitlichem und standardisiertem Muster beschrieben. Die Beschreibungen umfassen folgende Angaben:

- Name
- Synonyme
- Definition
- Typusregion
- Typusprofil
- Referenzprofile
- Untergrenze
- Obergrenze
- Lithologie
- Mächtigkeit
- Verbreitung

- Subformationen
- Leitbänke
- Biostratigraphie
- Alter
- Paläoökologie
- Wirtschaftliche Verwendung
- Literatur

Die Beschreibung der Subformationen (engl. member) erfolgt nach demselben Muster nach der jeweiligen Formation in alphabetischer Reihenfolge. In ähnlicher Anordnung werden die Beschreibungen der stratigraphischen Einheiten nach und nach in die Datenbank Litholex der DSK eingestellt, die im Internet unter <https://Litholex.bgr.de> abrufbar ist.

Bei der Namengebung der Einheiten wurden in Übereinstimmung mit STEININGER & PILLER (1999) folgende formale Grundsätze beachtet:

- Beibehaltung der bestehenden Bezeichnungen, soweit diese eindeutig und gut bekannt sind, z.B. Quaderkalk-Formation, Trochitenkalk-Formation, Hassmersheim-Subformation.
- Beseitigung von Synonymen nach dem Prioritätsprinzip, es sei denn ein Begriff ist allgemein bekannt und wird häufig gebraucht; es werden allerdings die Belange der Geologischen Dienste berücksichtigt.
- Weitestmöglicher Ersatz von Homonymen durch eindeutige neue Begriffe, vorzüglich unter Verwendung von geographischen Namen als Bestimmungswort.
- Vermeidung von Fossilnamen, es sei denn, sie sind eindeutig und gut bekannt. Dabei werden Namen von Taxa mit dem Grundwort zusammengeschrieben und recte gesetzt, z.B. Cycloidesbank, Spiriferinabank, Orbicularisschichten.
- Neue Namen entsprechend den Regeln des ISG nach der Typlokalität oder nach geographischen Namen aus der Typusregion. Das Bestimmungswort wird dabei stets substantivisch und ohne Beugungsendungen verwendet, z.B. Warburg-Formation, Hassmersheim-Subformation, Geislingen-Bank.

Um in den Bestand der eingeführten Namen nicht zu tief einzugreifen, wurden – entgegen den Empfehlungen des ISG – mehrfach auch solche Namen beibehalten, denen Reihenfolgen oder Lagebeziehungen zugrundeliegen. Das gilt insbesondere für viele Leitbänke, also z.B. Tonsteinhorizont 1 bis Tonsteinhorizont 6, Grenzbened, Untere Terebratelbank, aber auch für die Subgruppen Unterer, Mittlerer und Oberer Muschelkalk selbst. Auch in solchen Fällen, wo Grenzbeziehungen verändert wurden, der

Begriffsinhalt sich also verändert hat, wurde eine Neubenennung angestrebt, um Missverständnisse auszuschließen.

Für die Symbolgebung der lithostratigraphischen Einheiten schlagen wir einheitliche, hierarchisch aufgebaute Kürzel vor (Kap. 13.2). Diese setzen sich zusammen aus Kleinbuchstaben für Gruppe und Subgruppe und ohne Lücke angeschlossene einzelne Großbuchstaben für die Formationen – bzw. wo erforderlich einer Kombination von Großbuchstaben + Kleinbuchstaben. Die Kürzel für die Subformationen bestehen aus einer ohne Lücke dem Formationskürzel angeschlossenen Kombination von Großbuchstaben + Kleinbuchstaben. Die Hierarchieebene der Bank oder des Horizonts wird im Kürzel mit Bindestrich von dem Formations- bzw. Subformationskürzel getrennt, so dass sie als solche erkennbar bleibt und bei eindeutigem oder bei allostratigraphischem Kontext auch separat geschrieben werden kann. Damit ist auch der Tatsache Rechnung getragen, dass viele Leitbänke über Faziesgrenzen hinausreichen und von den lithostratigraphischen Einheiten unabhängig sind. Die Symbole für die Leitbänke werden aus Groß- und Kleinbuchstaben und aus Ziffern zusammengesetzt. So ergeben sich folgende Kombinationen:

Gruppe	m	Muschelkalk
Subgruppe	mo	Oberer Muschelkalk
Formation	moT	Trochitenkalk- Formation
Subformation	moTBa	Bauland-Subformation
Horizont	moTBa-Wk	Wellenkalk – oder einfach Wk
Bank	moTBa-Wk1	Wellenkalkbank 1 – oder einfach Wk1

Wo der stratigraphische Umfang einer Einheit den einer Subgruppe überschreitet, wird anstelle des Subgruppen-Kürzels tr (für Trias) gesetzt, also trE für Eschenbach-Formation (Kap. 8.5) und trG für Grafenwöhr-Formation (Kap. 8.6).

Leitbankstratigraphie (Allostratigraphie) – In Kapitel 5 werden zunächst die überregionalen Leitbänke mit ihren Typlokalitäten, geographischen Reichweiten, lateralen Faziesveränderungen, ihren paläoökologischen Zeigerfossilien und ihrer biostratigraphischen Position (Zonierung) nach einheitlichem, standardisiertem Muster in Anlehnung an die Formationsbeschreibungen dargestellt. Für viele dieser Leitbänke kann annähernd isochrone Entstehung angenommen werden, d.h. sie können als Zeitmarken gelten. Manche Leitbänke gehen über Faziesgrenzen hinweg, lassen sich also in mehreren zeitgleichen Formationen identifizieren und dienen damit der exakten, z. T. annähernd beckenweiten

stratigraphischen Korrelation. Außerdem ist die Leitbankstratigraphie des Muschelkalks – zumindest regional – so hoch auflösend wie keine andere stratigraphische Methode.

Anhand von Leitbänken, untergeordnet auch von anderen isochronen Leitflächen wurde durch die SKPT ein zusätzliches stratigraphisches System entwickelt (MENNING et al. 2005, LUTZ et al. 2005, HAGDORN & SIMON 2005), anhand dessen die Germanische Trias sich in Zeitabschnitte gliedern lässt. Für diese wurde der Begriff Folge neu definiert, der zuvor wie der Begriff Formation verwendet wurde, doch ohne klare terminologische Definition und ohne Unterscheidung. Die Folge ist damit ähnlich der Alloformation des ISG. Die Folgen sind potentiell beckenweit verbreitet, lassen sich aber nur dort sicher abgrenzen, wo die Leitflächen identifizierbar sind. Als Einheiten, die durch Zeitmarken definiert sind, gelten die Folgen also auch dort, wo die Leitflächen nicht festzustellen sind. Mit Hilfe der Biostratigraphie kann aber häufig ein Bereich eingegrenzt werden, in dem das Zeitäquivalent einer Leitfläche und damit eine Folgenreihe anzusetzen wäre. So weiß man beispielsweise, dass die Spiriferinabank und damit die Grenze m7–m8 dicht über dem ersten Vorkommen von *Ceratites evolutus* liegt. Die Folgen erhalten keine sprechenden Namen, denn sie werden als reine Zeitintervalle ohne die spezifische Gesteinsfüllung verstanden, zumal sich diese faziesbedingt lateral verändert. Die Folgen werden stattdessen mit Kürzeln bezeichnet. Der Muschelkalk wurde nach diesem Konzept in die neun Folgen m1 bis m9 gegliedert, von denen sich einige in Subfolgen unterteilen lassen (Kap. 5). Die Zahl der Zyklen in diesen Folgen ist noch genauer zu bestimmen, doch wurde sie bereits für die Kalibrierung der Regionalen Stratigraphischen Skala der STD 2016 benutzt (vgl. Kap. 6.1).

Abgrenzung und Leistung von Litho- und Leitbankstratigraphie – In der Praxis fallen Folgen- und Formationsgrenzen nicht selten zusammen. Das gilt u.a. für die Grenzen der Gruppen und Subgruppen (Kap. 8.1). Im Sinn einer einheitlichen und auch historisch gewachsenen Definition des Muschelkalks hat die SKPT die Buntsandstein/Muschelkalk-Grenze an die Basis des Grenzgelbkalks gelegt, die Grenze Muschelkalk/Keuper an die Basis des Grenzbonebeds bzw. des Sandsteins S1. An diesen Beschlüssen wird hier festgehalten. Auch die Untergliederung der Jena-Formation folgt der traditionellen Abgrenzung an den Leitbänken. Im Mittleren Muschelkalk sind die Formationsgrenzen vorzugsweise an überregional annähernd isochronen Faziesgrenzen definiert, die auch Folgenreihen entsprechen. Die häufige Übereinstimmung von Formations- und Folgenreihen ergibt sich aus der Geschichte des Mitteleuropäischen Beckens, in dem

sich die Lithologie annähernd beckenweit als Reflex auf globale oder kontinentale Ereignisse wie Meeresspiegelschwankungen oder Klimawandel änderte (Kap. 1.2, 1.3). Demgegenüber schlugen sich regionale Subsidenzschwankungen oder unterschiedliche paläogeographische Lage in Form unterschiedlicher Lithofazieskörper nieder und repräsentieren heute unterschiedliche Formationen. Dies gilt z.B. für Sandstein- oder Oolithkörper.

Andere Gliederungen – Zylostratigraphische, magnetostratigraphische und geochemische Gliederungen des Muschelkalks liefern zusätzliche Daten, die zum Verständnis des Ablagerungsgeschehens beitragen. Über Ergebnisse dieser Methoden wird in den Kapiteln 6 und 7 berichtet. Von den Bohrungen aus Gebieten mit überdecktem Muschelkalk sind allerdings nur wenige gekernt. Dort spielen geophysikalische Logs eine erhebliche Rolle, besonders wenn sie im Einzelfall an einem gekerntem Profil geeicht werden konnten. Mit der Handsonde im Aufschluss gewonnene Gammastrahlen-Logs sind für die Korrelation mit Bohrungen außerordentlich hilfreich. Über die Möglichkeiten der Log-Stratigraphie im Muschelkalk berichtet Kapitel 7.2.

4. Regionale Darstellungen

Den allgemeinen Kapiteln folgen 15 Regionalkapitel für den Muschelkalk in Deutschland, die i. W. nach Ausstrichgebieten und nach historischen Bearbeitungsgrenzen der Geologischen Dienste angelegt sind. Für den untertägigen, nur aus Bohrungen bekannten Muschelkalk des Hauptbeckens und den randfazialen Muschelkalk im Untergrund von Schwäbischer Alb und Molassebecken wurden eigene Kapitel angelegt. Ausstrichgebiete in deren Nachbarschaft werden trotz Zugehörigkeit zum gleichen Faziesraum gesondert dargestellt, weil von dort eine breitere Datenmenge verfügbar ist und wissenschaftsgeschichtliche Traditionen zu beachten sind. Das gilt in der Nachbarschaft des Norddeutschen Hauptbeckens für die Kapitel Osnabrücker Bergland, Harzvorland und Südliches Brandenburg, bei der südöstlichen Randfazies für das Ostbayern-Kapitel. In fünf Kapiteln wird der Muschelkalk in den Nachbarstaaten dargestellt, in einem weiteren die dem germanischen Muschelkalk zeitlich entsprechenden Einheiten der tethyalen Trias im bayerischen Teil der Nördlichen Kalkalpen.

Dank

Gerd Geyer, Würzburg, danken wir für seine Kommentare zu einer früheren Fassung der Arbeit, Manfred Menning, Potsdam, und Edgar Nitsch, Freiburg i. Br., für hilfreiche Hinweise, konstruktive Kritik und sorgfältige Durchsicht der Schlussfassung.

Schriftenverzeichnis

- AIGNER, T. & BACHMANN, G. H. (1992): Sequence-stratigraphic framework of the German Triassic. – *Sedimentary Geology*, 80: 115-135; Amsterdam.
- AIGNER, T., SCHAUER, M., JUNGHANS, W.-D. & REINHARDT, L. (1995): Outcrop gamma-ray logging and its applications: examples from the German Triassic. – *Sedimentary Geology*, 100: 47-61; Amsterdam.
- ASSMANN, P. (1944): Die Stratigraphie der oberschlesischen Trias. Teil 2: Der Muschelkalk. – *Abhandlungen des Reichsamts für Bodenforschung, N.F.* 208: 1-50; Berlin.
- CCSK/DUGW (1977): Stratigraphische Richtlinien. Empfehlungen der Stratigraphischen Kommission der Geologischen Wissenschaften zu stratigraphischen Verfahrensweisen. – *Newsletter on Stratigraphy*, 6: 131-151; Berlin.
- ECK, H. (1865): Ueber die Formationen des bunten Sandsteins und des Muschelkalks in Oberschlesien und ihre Versteinerungen. – 149 S.; Berlin (R. Friedländer u. Sohn).
- FRANTZEN, W. (1888): Untersuchungen über die Gliederung des Unteren Muschelkalks in einem Theile von Thüringen und Hessen und über die Natur der Oolithkörner in diesen Gebirgsschichten. – *Jahrbuch der königlich preussischen geologischen Landesanstalt und Bergakademie*, 8 (für 1887): 1-93; Berlin.
- FRANTZEN, W. (1889): Untersuchungen über die Gliederung des Unteren Muschelkalks im nordöstlichen Westfalen und im südwestlichen Hannover. – *Jahrbuch der königlich preussischen geologischen Landesanstalt*, 8: 453-479; Berlin.
- FÜCHSEL, G. C. (1761): *Historia terrae et maris, ex historia Thuringiae, per montium descriptionem, eruta.* – *Acta Academiae electoralis Moguntinae*, 2: 44-254; Erfurt.
- GWINNER, M. P. (1970): Revision der lithostratigraphischen Nomenklatur im Oberen Hauptmuschelkalk des nördlichen Baden-Württemberg. – *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Monatshefte* 1970 (2): 77-87; Stuttgart.
- HAGDORN, H., HICKETHIER, H., HORN, M. & SIMON, T. (1987): Profile durch den hessischen, unterfränkischen und baden-württembergischen Muschelkalk. – *Geologisches Jahrbuch Hessen*, 115: 131-160; Wiesbaden.
- HAGDORN, H., HORN, M. & SIMON, T. (1993): Vorschläge für eine lithostratigraphische Gliederung und Nomenklatur des Muschelkalks in Deutschland. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): *Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991* (Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, 2): 39-46; Stuttgart, Korb (Goldschneck).
- HAGDORN, H. & SIMON, T. (1985): Geologie und Landschaft des Hohenloher Landes. – *Forschungen aus Württembergisch Franken*, 28: 186 S. [überarb. u. erw. Aufl. 1988]; Sigmaringen (Thorbecke).
- HAGDORN, H. & SIMON, T. (1997): Gesteinsaufbau und Schichtenfolge des Oberen Muschelkalks. – In: HAUNSCHILD, H.: *Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25 000, Blatt 6426 Aub*: 21-36; München.
- HAGDORN, H. & SIMON, T. (2005): Der Muschelkalk in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. – *Newsletter on Stratigraphy*, 41 (1-3): 143-158; Berlin, Stuttgart.
- HEDBERG, H.D.(ed.) (1976): *International Stratigraphic Guide. A Guide to Stratigraphic Classification, Terminology and Procedure.* – XX+200 S.; New York (Wiley).
- KOZUR, H. (1974a): Biostratigraphie der germanischen Mitteltrias. – *Freiberger Forschungshefte, C* 280: Teil 1: 56 S., Teil 2: 71 S., Teil 3: 15 Anlagen; Leipzig.
- KOZUR, H. (1974b): Probleme der Triasgliederung und Parallelisierung der germanischen und tethyalen Trias. Teil I: Abgrenzung und Gliederung der Trias. – *Freiberger Forschungshefte, C* 298: 139-197; Leipzig.
- KOZUR, H. (1975): Probleme der Triasgliederung und Parallelisierung der germanischen und tethyalen Trias. Teil II: Anschluss der germanischen Trias an die internationale Triasgliederung. – *Freiberger Forschungshefte, C* 304: 51-77; Leipzig.
- LBEG (LANDESANSTALT FÜR BERGBAU, ENERGIE NIEDERSACHSEN) (2015): *Symbolschlüssel Geologie.* – 4. Aufl.; Hannover (LBEG).
- LUTZ, M., ETZOLD, A., KÄDING, K.-CH., LEPPER, J., HAGDORN, H., NITSCH, E. & MENNING, M. (2005): Lithofazies und Leitflächen: Grundlagen einer dualen lithostratigraphischen Gliederung. – *Newsletters on Stratigraphy*, 41 (1/3): 211-223; Berlin, Stuttgart.
- MENNING, M. (2000): Stratigraphische Nomenklatur für die Germanische Trias (von Alberti 1834) und die Dyas (Marcou 1859, Geinitz 1861). – *Zeitschrift für geologische Wissenschaften*, 28 (1/2): 281-290; Berlin.
- MENNING, M., GAST, R., HAGDORN, H., KÄDING, K.-C., SIMON, T., SZURLIES, M. & NITSCH, E. (2005): Zeitskala für Perm und Trias in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002, zyklolithostratigraphische Kalibrierung von höherer Dyas und Germanischer Trias und das Alter der Stufen Roadium bis Rhaetium 2005. – *Newsletters on Stratigraphy*, 41 (1/3): 173-210; Berlin, Stuttgart.
- MENNING, M., SCHRÖDER, B., PLEIN, E., SIMON, T., LEPPER, J., RÖHLING, H.-G., STAPF, K., LÜTZNER, H., KÄDING, K.-C., PAUL, J., HORN, M., HAGDORN, H., BEUTLER, G. & NITSCH, E. (2011): Beschlüsse der Deutschen Stratigraphischen Kommission 1991-2010 zu Perm und Trias von Mitteleuropa. – *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 162: 1-18; Stuttgart.
- OCKERT, W. & REIN, S. (2000): Biostratigraphische Gliederung des Oberen Muschelkalks in Thüringen. – *Beiträge zur Geologie von Thüringen, N.F.* 7: 195-228; Jena.
- OPPEL, A. (1856-1858): Die Juraformation Englands, Frankreichs und des südwestlichen Deutschlands nach ihren einzelnen Gliedern eingetheilt und verglichen. – 857 S.; Stuttgart (Ebner und Seubert).
- PHILIPPI, E. (1901): Die Ceratiten des oberen deutschen Muschelkalkes. – *Paläontologische Abhandlungen, N.F.* 4: 347-457; Jena.
- REIN, S. (2007): Die Evolution der Biospezies „*Ceratites nodosus*“. Vom typologischen Art-Konzept zum Biospezies-Konzept. – *Beiträge zur Geologie von Thüringen, N.F.* 14: 85-112; Jena.
- RIEDEL, A. (1916): Beiträge zur Paläontologie und Stratigraphie der Ceratiten des deutschen Oberen Muschelkalks. – *Jahrbuch der preussischen geologischen Landes-Anstalt*, 37: 1-116; Berlin.
- SALVADOR, A. (Ed.) (1994): *International Stratigraphic Guide: A guide to stratigraphic classification, terminology, and procedure.* – 2. Aufl.: XIX + 214 S.; Trondheim, Boulder (International Union of Geological Sciences/Geological Society of America).

- STD 2016 (Deutsche Stratigraphische Kommission, Hrsg.; Koordination und Gestaltung: M. Menning & A. Hendrich, 2016): Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2016. – Potsdam (GeoForschungsZentrum).
- STEININGER, F.F. & PILLER, W.E. (Hrsg.) (1999): Empfehlungen (Richtlinien) zur Handhabung der stratigraphischen Nomenklatur. – Courier Forschungsinstitut Senckenberg, 209: 19 S., Frankfurt a. M.
- SUBKOMMISSION PERM-TRIAS (SKPT) (2011): Beschlüsse der Deutschen Stratigraphischen Kommission 1991-2010 zu Perm und Trias von Mitteleuropa. – Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 162 (1): 1-18; Stuttgart.
- SZULC, J. (2000): Middle Triassic evolution of the northern Peri-Tethys area as influenced by early opening of the Tethys Ocean. – *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 70: 1-48; Kraków.
- TGL 25234/11 (1974): Stratigraphische Skala der DDR: Trias. – 17 S.; Leipzig (Verlag für Standardisierung).
- URLICHS, M. (1993): Zur Gliederung des Oberen Muschelkalks in Baden-Württemberg mit Ceratiten. – In: HAGEDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991 (Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, 2): 153-156; Stuttgart, Korb (Goldschneck).
- VOLLRATH, P. (1923): Beiträge zur Stratigraphie und Paläogeographie des fränkischen Wellengebirges. – *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie*, Beil.-Bd. 50: 120-288; Stuttgart.
- WAGNER, G. (1913): Beiträge zur Stratigraphie und Bildungsgeschichte des oberen Hauptmuschelkalks und der unteren Lettenkohle in Franken. – *Geologisch-paläontologische Abhandlungen, Neue Folge* 12: 180 S.; Jena.
- ZENKER, J. C. (1836): Erläuterung des idealen Profils der jennaischen Bergschichten. – *Historisch-topographisches Taschenbuch von Jena und seiner Umgebung*: 334-338; Jena (Friedrich Frommann) [Nachdruck Bad Langensalza 2011, Verlag Rockstuhl].

Manuskript eingegangen: 17.08.2016

Annahme zur Veröffentlichung: 18.10.2016

HAGDORN, H., FREUDENBERGER, W., RÖHLING, H.-G., RÖHLING, S. & SIMON, T. (2020): Heutige Verbreitung des Muschelkalks und Abgrenzung der Bearbeitungsgebiete. – In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Koordination und Redaktion: HAGDORN, H., SIMON, T., für die Subkommission Perm-Trias): Stratigraphie von Deutschland XIII. Muschelkalk. – Schriftenr. Dt. Ges. Geowiss., 91: S. 33-40, 8 Abb.; Berlin.

1.1

Heutige Verbreitung des Muschelkalks und Abgrenzung der Bearbeitungsgebiete

[Present day geographical extension of the Muschelkalk and demarcation of the working areas]

Hans Hagdorn¹, Walter Freudenberger², Heinz-Gerd Röhling³, Simone Röhling⁴ und Theo Simon⁵

¹ Muschelkalkmuseum, Schloss-Str. 11, D-74653 Ingelfingen, e-mail: encrinus@hagdorn-ingelfingen.de

² Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hans-Högn-Str. 12, D-95030 Hof, e-mail: walter.freudenberger@lfu.bayern.de

³ Erich-Baron-Weg 100, 12623 Berlin, e-mail: roehling-geologie@gmx.de

⁴ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Dienstbereich Berlin, Wilhelmstraße 25-30, 13593 Berlin, e-mail: simone.roehling@bgr.de

⁵ Gehrendshalde 42, D-74427 Fichtenberg, (zuvor LGRB Baden Württemberg), e-mail: simon-fichtenberg@gmx.de

Kurzfassung

Das Verbreitungsgebiet des Muschelkalks in den Naturräumen Deutschlands und der Nachbarländer wird dargestellt, ebenso die Gebiete, in denen Muschelkalk untertägig vorkommt. Das Ausstrichsgebiet des Muschelkalks an der Oberfläche beläuft sich mit 19.850 km² auf ca. 5 % von der Gesamtfläche des Bundesgebiets. Auf ca. 175.000 km² (ca. 49 % der Fläche des Bundesgebiets) ist Muschelkalk von jüngeren Schichten bedeckt, auf 165.000 km² (ca. 46 % der Fläche) wurde Muschelkalk nie abgelagert oder bereits wieder abgetragen. Die Abbildungen zeigen natürliche Muschelkalk-Aufschlüsse sowie Karten der obertägigen und überdeckten Muschelkalkgebiete mit der Lage der Typusprofile der durch die Subkommission Perm-Trias (SKPT) genehmigten Formationen und den Grenzen der 15 regionalen Bearbeitungsgebiete.

Abstract

The surface and subsurface distribution area of the Muschelkalk in the macrochores of Germany and its neighbouring countries is delineated. The surface distribution area is 19.850 km² and covers approx. 5 % of the entire area of the federal territory of Germany. On 175.000 km² (approx. 49 % of the territory), Muschelkalk is covered by younger sediments, on 165.000 km² (approx. 46 % of the territory), Muschelkalk has never been deposited or has been removed by erosion. The figures show natural Muschelkalk outcrops and maps of the surface and subsurface Muschelkalk distribution with the positions of the type localities of the formations approved by the Permian and Triassic

Subcommission (SKPT) as well as the boundaries of the 15 studied regional areas.

Schlüsselwörter: Verbreitungsgebiet, Muschelkalk, Deutschland, Typlokalitäten der Formationen

Keywords: distribution areas, Muschelkalk, Germany, type localities of formations

Muschelkalk zeigt sich in Deutschland in fast allen Bundesländern mit teils kleinen und isolierten, teils großflächigen, landschaftsprägenden Ausstrichsgebieten an der Erdoberfläche. Hierzu zählen die klassischen Muschelkalkregionen in Thüringen, wo Georg Christian Füchsel den Begriff Muschelkalk überhaupt prägte (Füchsel 1761), und das Süddeutsche Schichtstufenland in Bayern und Baden-Württemberg, wo Friedrich von Alberti den Muschelkalk als zentralen Teil der Trias definiert hat (v. Alberti 1834). Flächenhaft streicht Muschelkalk auch in der Eifeler Nord-Süd-Zone und im Zentrum der Pfälzer Mulde (Rheinland-Pfalz, Saarland), im Weser- und Osnabrücker Bergland (Nordrhein-Westfalen) und am Harzrand (Niedersachsen, Sachsen-Anhalt) aus. Kleinere Oberflächenvorkommen liegen in tektonischen (Hessen) und über salztektonischen Strukturen im Norddeutschen Tiefland (Brandenburg, Niedersachsen).

Nachdem sich die richtige Parallelisierung der mittel- und süddeutschen Formationen zu Beginn der 1820er Jahre durchgesetzt hatte (Kap. 2.1), ließ sich der heutige Muschelkalkausstrich durch das Schichtstufenland verfolgen. So schreibt KEFERSTEIN (1825: 23):

Teutschland: den Alvenslebenschen Höhenzug und den Harz umgebend, zwischen beiden Gebirgen oft in isolirten Höhen auftretend, wie am Elm, Hackel und

Huy bey Halberstadt; in mächtigen Massen verbreitet im Eichsfelde; in den Wesergegenden einzelne Züge, zuweilen nur schwache Lager bildend. – In Hessen und Hannover in vielen Zügen und einzelnen Bergen, dem Bunten Sandstein-Plateau aufgelagert, in der Rhön durch Basalt oft bedeutend erhoben; in Thüringen in mächtigen Zügen dem Thüringerwalde und dem Kyffhäusergebirge folgend und das Bassin von Erfurt einschließend; in Sachsen, Böhmen, Schlesien, überhaupt in der östlichen Urgebirgsmasse wohl ganz

fehlend. – In Süddeutschland: als schmaler Zug dem Thüringerwalde und Fichtelgebirge (bey Bayreuth) folgend, aber in außerordentlicher Verbreitung über Meiningen und Würzburg nach Bayern, Württemberg und Baden ziehend, theils das Plateau des bunten Sandsteins bedeckend, theils den östlichen Fuß des Rheinischen Urgebirges bildend; hier viele Steinsalzlager und reiche Salzquellen führend, in deren Nähe der Kalk oft rauhwackenartig ist; diese Lager kennt man auf der Linie von Jaxtfeld, Offenau, Hall, Sulz,

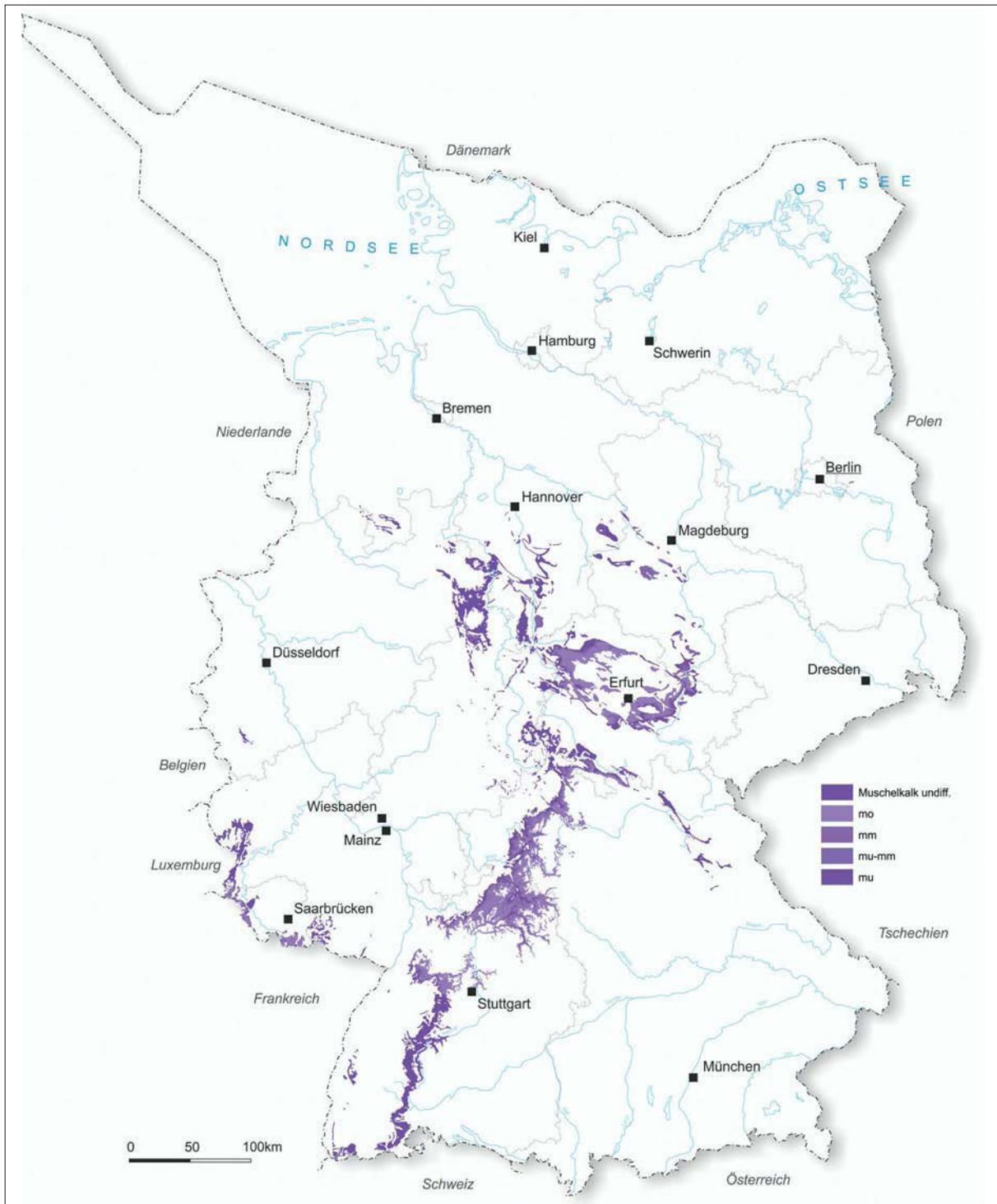


Abb. 1: Oberflächenverbreitung von Muschelkalkgesteinen in Deutschland (Grafik: BGR).

Wimpfen, Schwemmungen [sic], Dürnheim, Rappenuau; hier ist die Formation meist durch jüngere Bildungen bedeckt, oft durch Flußthäler aufgeschlossen, zieht sich von hier um den Schwarzwald nach der Gegend von Basel. [...] Frankreich: begleitend den westlichen Fuß der Vogesen; von Epinal über Lüneville, Saargemünd bis Merzig, auch wahrscheinlich in Elsaß und Lothringen vorhanden. In England fehlend, oder vertreten durch einige kalkige Flötze in der großen Mergelbildung des red marl. In Irland, Schottland, Skandinavien fehlend.

Damit hat KEFERSTEIN den Muschelkalk-Ausstrich klar umrissen. Außerdem ordnete er auch den Alpenkalk bzw. Teile davon dem Muschelkalk zu und war sich deren Altersgleichheit bewusst, wenn auch der Begriff Trias noch nicht verfügbar war.

Das Ablagerungsgebiet der klassischen Germanischen Trias in dreigliedriger Fazies von Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper erstreckte sich über den nördlichen Teil Mitteleuropas zwischen dem Vindelizisch-Böhmischen Massiv im Süden, dem Gallischen Massiv und dem London-Brabanter Massiv im Westen und dem Fennoskandischen Schild und der Russischen Tafel im Norden und Osten (Kap. 1.2; 1.3).

Der heutige Ausstrich des Muschelkalks an der Erdoberfläche (Abb. 1) bleibt i. W. auf die Schichtstufenlandschaften Süddeutschlands und Ostfrankreichs, das Luxemburger Gutland, das Thüringer Becken, das Weserbergland und auf tektonische Gräben, Senken und Aufwölbungen in den Mittelgebirgen begrenzt. Eine durchgehende Muschelkalk-Schichtstufe mit ihrer Landterrasse erstreckt sich als Schlehen- und Heckengäu vom Schweizer Tafeljura über den Hochrhein entlang dem Schwarzwald-Ostrand bis zum Thüringer Wald, eine weitere bildet links des Rheins den Süd- und Westrand der Vogesen und des Pfälzer Waldes bis zur Eifel. Kuppen und Plateaus mit tertiären Einebnungsflächen formen zusammen mit teils engen Flusstälern die Muschelkalklandschaften des Thüringer Beckens, Nordhessens und des Weserberglands. Im Thüringer Becken entstanden darauf fruchtbare Ackerbau-landschaften. Schlehenhecken und Steinriegel (Lesesteinwälle), steile, oft heute noch kunstvoll terrassierte Weingärten, Felskränze und Trockenrasen, vielerorts mit wärmeliebenden Floren und Faunen (Steppenheide Robert Gradmanns), prägen die Muschelkalkabschnitte der Täler von Mosel, Saale, Unstrut, Main und Sauer, vom Neckar mit seinen Nebenflüssen Enz, Kocher und Jagst und von der Tauber oder der Wutach. Im Kraichgau, auf der Hohenloher Ebene, den Kocher-Jagst-Riedeln, dem nordbadischen Bauland und in Mainfranken weitete sich die meist von Löss und Lettenkeuper bedeckte Muschelkalktafel zu fruchtbaren Kornebenen, den Gäuflächen, die von den Flüssen zertalt und in einzelne Riedel zerlegt sind.

In den Muschelkalklandschaften liegen die meisten natürlichen Aufschlüsse in den Tälern, besonders an den Kleben (Klippen, Kliffé), wie im Fränkischen die Felswände an Fluss-Prallhängen heißen (Abb. 2), und in Klingen, schluchtartig eingeschnittenen Seitentälern, deren Bäche, nach Wolkenbrüchen angeschwollen, in Kaskaden über die mächtigen Werksteinbänke stürzen und die Tonsteinhorizonte zu Hohlkehlen auswaschen (Abb. 3). Natürliche Aufschlüsse gibt es auch an den Talkanten, aber nur, wo dick gebankte Kalksteine schroffe Felskränze bilden. Im Unteren Muschelkalk sind dies die Terebratelbänke und die Schaumkalkbänke der Jena-Formation, zum Beispiel in den Tälern von Main und Saale (Abb. 4), im Oberen Muschelkalk die Dolomitbänke der Rottweil-Formation am Oberen Neckar oder die massigen Bruchschillkalke in der Kalkfazies der Meißner-Formation am mittleren Neckar, besonders ausgeprägt in den Hessigheimer Felsengärten (Abb. 5). Ebenso schroffe Hangkanten entlang des Mains und der Tauber bilden im südlichen Unterfranken bis ins badische Frankenland (Randersacker bei Würzburg – Röttingen – Rothenburg) dick gebankte, verwitterungsresistente Bruchschillkalke der Quaderkalk-Formation des Oberen Muschelkalks.

Wo die Flüsse den Muschelkalk vollständig bis in die liegenden Röttone durchschnitten haben, zeigen die Talflanken die charakteristische, gesteinsbedingte Dreigliederung von Steilanstieg im morphologisch harten Unteren Muschelkalk, Verflachung im subrodierten Mittleren und erneut steilem Anstieg im Oberen Muschelkalk (Abb. 6). Natürliche Aufschlüsse in den Evaporitgesteinen des Mittleren Muschelkalks gibt es nur in seltenen Ausnahmefällen. Rohstoff-, Grundwasser- und Forschungsbohrungen erschließen den Mittleren Muschelkalk in weiten Bereichen vollständig, so dass Verbreitung und Schichtaufbau gut bekannt sind (z. B. FREUDENBERGER 2009).

Weniger ausgedehnte Muschelkalkgebiete sind die isolierten Schollen in den Vorbergzonen auf beiden Seiten des Oberrheingraben, in schmalen Streifen entlang der Fränkischen Linie am Rand der Südwestdeutschen Großscholle (CARLÉ 1955), oder in Schlesien (Polen) am Sudeten-Nordrand, in Gräben und Horsten der Mittelgebirge, und schließlich in der Norddeutschen Tiefebene die Muschelkalkaufbrüche über Salzdiapiren, zum Beispiel bei Rüdersdorf und Lüneburg, bei Winterswijk in den Niederlanden oder im historischen „Witte Kliff“ Helgolands, dessen Reste allerdings heute unter dem Meeresspiegel liegen. In Polen erstreckt sich von Oberschlesien bis ins Krakauer Hügelland wieder Muschelkalk, liegt dort aber größtenteils unter pleistozäner Bedeckung. Rund um das Polnische Mittelgebirge, das Heiligkreuzgebirge, streicht der Muschelkalk in einem schmalen Band nahe seiner östlichen Verbreitungsgrenze aus.



Abb. 2: Prallhang – im Fränkischen Kleb (= Klippe, Kliff) genannt – im Oberen Muschelkalk des Bühlertals bei Sulzdorf (Landkreis Schwäbisch Hall) (Foto: H. Hagdorn, 2013).

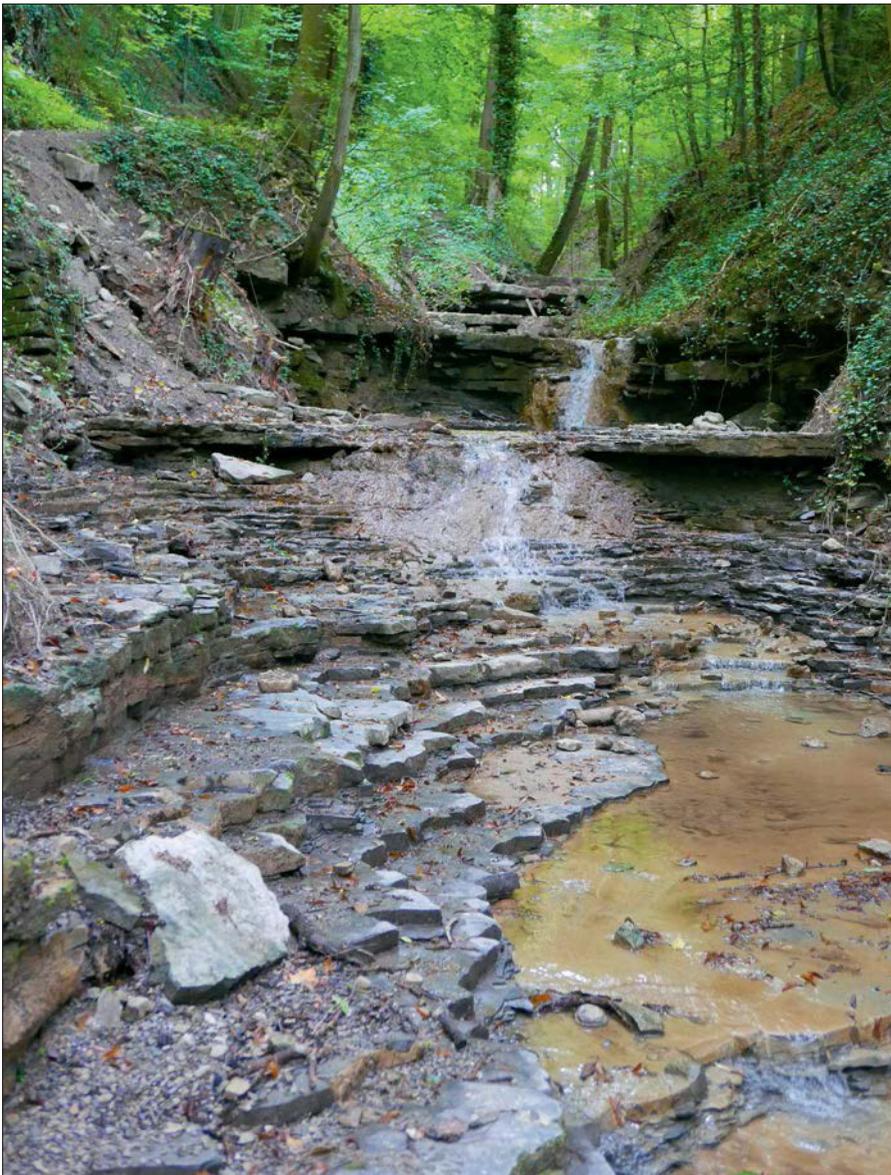


Abb. 3: Frische Erosion nach katastrophalem Starkregen in einer Bachklinge im Oberen Muschelkalk (Meißner-Formation) bei Kloster Schöntal (Hohenlohekreis). Dickere Schillkalksteinbänke bilden Stufen, unter denen weichere Gesteine (Tonplatten-Fazies) ausgespült werden (Foto: H. Hagdorn, 2016).

Abb. 4: Felsenkranz im Maintal zwischen Würzburg und Karlstadt. Die Schaumkalkbänke bilden Bastionen und Gesimse. Auf den dünnen Rohböden vom Rendzina-Typ wachsen xerothermophile (wärmeliebende) Pflanzengesellschaften (Trockenrasen, „Steppenheide“-Vegetation) (Foto: H. Hagdorn, ca. 1995).



Das Ablagerungsgebiet des Muschelkalks zur Zeit der Mittleren Trias erstreckte sich über den nördlichen Teil Mitteleuropas zwischen dem Vindelizisch-Böhmischen Massiv im Süden, dem Gallischen und dem London-Brabanter Massiv im Westen und dem Fennoskandischen Schild und der Russischen Tafel im Norden und Osten (Kap. 1.2 und 1.3). Die heutige Ausstrichfläche des Muschelkalks in Deutschland beträgt nach der Geologischen Karte der Bundesrepublik Deutschland (GK 1000) etwa 19.850 km². Das sind etwa 5 % von der Gesamtfläche des Bundesgebiets. Auf ca. 175.000 km² – ca. 49 % der Fläche des Bundesgebiets – ist Muschelkalk von jüngeren Schichten bedeckt im Untergrund vorhanden und auf etwa 165.000 km² – ca. 46 % des Bundesgebiets – fehlt Muschelkalk heute, d. h. er wurde gar nicht abgelagert oder nachträglich wieder abgetragen. Das Verbreitungsgebiet des Muschelkalks in Deutschland an der Oberfläche ist in Abb. 1 dargestellt.

Die Kenntnis der Muschelkalkschichten beruht weitgehend auf künstlichen Aufschlüssen. So wurden im Mittelgebirge, im Thüringer Becken und im Süddeutschen Schichtstufenland seit Mitte des 20. Jahrhunderts zahlreiche Großsteinbrüche und Schotterwerke angelegt, die umfangreiche und zusammenhängende Profile lieferten, auf denen die bankstratigraphische Korrelierung beruht. Viele dieser künstlichen Aufschlüsse entstanden an den Hangkanten der Flusstäler, besonders dort, wo Verkehrswege durch die steil eingetieften Seitenbäche vom Talboden zur höheren Landterrasse hinaufführen. Dort waren schon die historischen, oft nur zeitweilig betriebenen Abbaustellen auf Bruchstein angelegt, aus denen die Großsteinbrüche hervorgegangen sind.

Ausgedehnte Bohraktivität hat in den vergangenen Jahrzehnten die Kenntnis des versenkten Muschelkalks im Norddeutschen Tiefland, unter der Nord- und Ostsee sowie in Zentral- und Nord-Polen gefördert. Der Muschelkalk ist im Untergrund des Norddeutschen Beckens fast flächig verbreitet, ausgenommen sind lokale Hochlagen auf Salinarstrukturen, die den Muschelkalk durchstoßen haben und ihrerseits durch jüngere Sedimente bedeckt sind. Die heutige Meereshöhe der Muschelkalkoberfläche, schwankt zwischen 0 und ca. 400 m über NN in den südlichen Randbereichen des Norddeutschen Beckens, wo der Muschelkalk z. B. im Osnabrücker Bergland, im Subherzyn oder im Raum Rüdersdorf teilweise noch übertäglich ansteht, und bis zu 7000 m unter NN im Norden Schleswig-Holsteins (Glückstadt-Graben). Der Muschelkalk zeigt, abgesehen von lokalen Schichtreduktionen in den Randbereichen von Salinarstrukturen (Subrosion oder Schwellenbildung), nach den Bohrergebnissen und der Interpretation reflexionsseismischer Messungen eine relativ gleichbleibende primäre Mächtigkeit zwischen weniger als 200 m und mehr als 400 m, letztere im Bereich des Glückstadt-, des Horn- und des Westdorf-Grabens. Weitere Depozentren sind die Helgoland-Senke und die Mecklenburg-Senke und wenige Bereiche im südlichen Oberrheingraben mit Mächtigkeiten von etwa mehr als 350 m. Auch im Raum Müritz-Havel können lokal mehr als 400 m erreicht werden. Nach Norden, in Richtung zum langgestreckten Strukturzug Ringköbigen-Fünen-Rügen-Schwelle und nach Süden zum Rheinischen Massiv und den am südlichen Beckenrand gelegenen Schwellen wie der Eichsfeld-Altmark-, der Hunte- oder der Niederländischen Schwelle nimmt die Mächtigkeit auf Werte von unter 200 m ab (vgl. auch WOLBURG 1969, GAERTNER 1993, GAERTNER & RÖHLING 1993,



Abb. 5: Die Felsengärten von Helligheim am mittleren Neckar (Künzelsau-Subformation der Meißner-Formation; Naturdenkmal). Bedingt durch aktive Subrosion von Gesteinen des Mittleren Muschelkalks kommt es immer wieder zum Einsturz einzelner Felstürme gegen das Neckartal. Landschaftsprägend ist die Terrassierung der historischen schwäbischen Weinberglandschaft (Foto: H. Hagdorn, 2011).



Abb. 6: Das Kochertal bei Ingelfingen (Hohenlohe) mit dreigliedertem Talprofil: Steilanstieg im morphologisch widerstandsfähigen Unteren Muschelkalk (Jena-Formation) aus der weiten Talsohle in der Rötton-Formation, darüber Verebnungsfläche im stark abgelaugten Mittleren Muschelkalk und erneuter Steilanstieg im Oberen Muschelkalk. Die Lesesteinriegel der fränkischen Weinbaulandschaft zeigen stets Oberen Muschelkalk mit dickbankigen Gesteinen der Trochitenkalk- und der Meißner-Formation an. Darüber die Landterrasse der Hohenloher Ebene mit Lettenkeuper-Bedeckung (Foto: H. Hagdorn, 2016).

BEUTLER 1993, BRÜCKNER-RÖHLING & KOCKEL 1999). Diese groben Darstellungen zeigen, dass die alten, aus dem Buntsandstein ererbten, am südlichen Beckenrand vor allem NNE streichenden Großstrukturen auch die Sedimentation des Muschelkalks steuern. Die beobachteten Mächtigkeitsschwankungen im Oberen und Unteren Muschelkalk werden primär durch Schichtreduktionen in Richtung der Beckenränder sowie der beckeninternen Schwellen und erst in zweiter Linie durch Schichtlücken repräsentiert. Dagegen haben zur Zeit des Mittleren Muschelkalks auch tektonische Bewegungen die Mächtigkeitverteilung dieser Schichtenfolge beeinflusst (GAERTNER & RÖHLING 1993, BRÜCKNER-RÖHLING 1999, RÖHLING 2000, HÄRING 2001). Tiefbohrungen im Oberrheingraben, im württembergischen und bayerischen Alpenvorland sowie im

Schwäbisch-Fränkischen Keupergebiet und der Alb tragen zur Kenntnis der südlichen und südöstlichen Muschelkalk-Randfazies bei, die sich nahe dem Beckenrand nicht mehr deutlich vom Buntsandstein und vom Keuper trennen lässt (EMMERT 1964, FREUDENBERGER 1996; Kap. 8.6, 9.10 und 9.15).

Gesteine des Muschelkalks kommen demnach in allen Bundesländern vor, in Bremen, Hamburg, Schleswig-Holstein, Berlin, Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen allerdings nicht an der Oberfläche. Den Flächenanteilen, die der Muschelkalkausstrich in den einzelnen Ländern einnimmt, entspricht i. W. auch die stratigraphische und paläontologische Bearbeitungsdichte, die demnach in Baden-Württemberg, Bayern und den ehemals preußischen Ländern am größten ist. Entscheidende Forschungsimpulse sind dabei von

Abb. 7: Tonplatten des Oberen Muschelkalks werden an windexponierten Hängen der Elm-Antikline (Niedersachsen) ausgepflügt und liefern bis heute gut erhaltene Ceratiten, die eine exakte Kartierung und Einstufung der darunter anstehenden Ceratitenzonen erlauben. Elmhaus bei Schöninggen (Foto: H. Hagdorn, 2005).

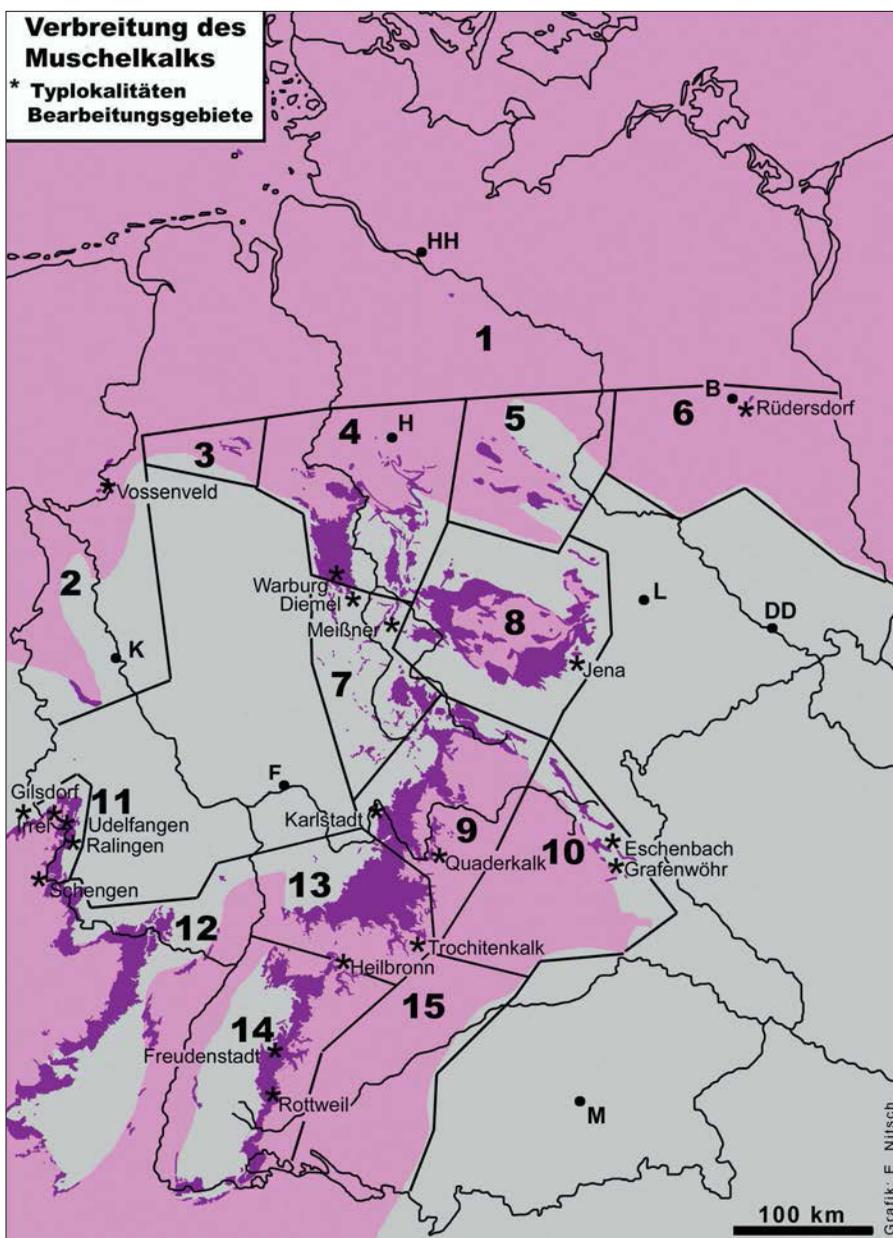


Abb. 8: Verbreitung des Muschelkalks in Deutschland. Violett: Oberflächenverbreitung; Pink: untertägige Verbreitung; Grau: Gebiete ohne Muschelkalkablagerung und Gebiete sekundärer Abtragung. Abgrenzung der Bearbeitungsgebiete in den Regionalkapiteln 9.1 bis 9.15 sowie Lage der Typuslokalitäten bzw. Typusgebiete der Formationen (Sterne) (Grafikgrundlage: E. Nitsch).

der Preußischen Geologischen Landesanstalt ausgegangen, an deren Untergliederung des Muschelkalks sich weitere Länder angeschlossen hatten. Manche regionale Untersuchungen, die von Universitätsinstituten ausgingen, und natürlich die Bearbeitungen der Geologischen Landesdienste endeten an den Ländergrenzen. Daraus ergaben sich die vielen homonymen und synonymen Begriffe für stratigraphische Einheiten, die es dem Nichtfachmann schwer machen sich zurechtzufinden.

Die vorliegende Regionaldarstellung des Muschelkalks durch die Subkommission Perm/Trias der Deutschen Stratigraphischen Kommission ist in ihrer Gliederung nicht grundsätzlich an die Gebiete der Bundesländer gebunden, sondern kann die Bearbeitungsgebiete nach regionalgeologischen oder nach naturräumlichen Kriterien abgrenzen. Ein Blick auf die Gliederung der Regionalkapitel (Abb. 8) zeigt jedoch, dass manch ein geographisch definiertes Gebiet gleichzeitig den Ländergrenzen folgt oder dass es aus historischen Gründen nahe liegt, die Bearbeitungsgrenzen traditionell zu ziehen. So schien es z. B. sinnvoll die Muschelkalkgebiete am Oberlauf der Tauber auf bayerischem Gebiet gegen geographisch-naturräumliche Gesichtspunkte im Kapitel 9. 9 (Westliches Franken) zu behandeln, weil sie nach bayerischer Nomenklatur kartiert und korreliert wurden. Andererseits werden auch die thüringischen Muschelkalkgebiete südlich des Thüringer Waldes, die sowohl naturräumlich als auch nach ihrer Fazies dem nordfränkischen Schichtstufenland näher stehen, gleichfalls in Kapitel 9. 9 dargestellt.

Abb. 8 zeigt die Muschelkalkverbreitung und die Bearbeitungsgrenzen der 15 Regionalkapitel, außerdem wo die Typlokalitäten der Formationen liegen. Daraus geht deutlich hervor, dass relativ kleine Gebiete nahe den randlichen Ablagerungsgrenzen des Muschelkalks aufgrund der dort stärkeren Faziesdifferenzierung mehr lithostratigraphische Einheiten erforderlich machten als vergleichsweise ausgedehnte Gebiete in beckenzentraler Lage.

Dank

Edgar Nitsch, Landesamt für Geologie Rohstoffe und Bergbau, Freiburg i. Br., hat die Grundlage für die Grafik in Abb. 8 erstellt; für Abb. 1 danken wir Jens Rätz, Bundesanstalt für Geologie und Rohstoffe, Berlin. Edgar Nitsch hat das Manuskript sorgfältig begutachtet.

Schriftenverzeichnis

- ALBERTI, F. v. (1834): Beitrag zu einer Monographie des Bunten Sandsteins, Muschelkalks und Keupers, und die Verbindung dieser Gebilde zu einer Formation. – 366 S.; Stuttgart (Cotta). [Reprographischer Nachdruck der Ausgabe Stuttgart (Cotta) 1834. Mit einem Vorwort des Herausgebers und einem biographischen Essay von W. HANSCH, 366+47 S.; Ingelfingen (1998)].
- BEUTLER, G. (1993): Der Muschelkalk zwischen Rügen und Grabfeld. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991, 47-56; Stuttgart, Korb (Goldschneck).
- BRÜCKNER-RÖHLING, S. (1999): Sequenzstratigraphie des Mittleren Muschelkalks in Norddeutschland und der Deutschen Nordsee. – BGR-Archiv-Nr. 117 876, 16. S.; Hannover [unveröffentlicht].
- BRÜCKNER-RÖHLING, S. & KOCKEL, F. (1999): Muschelkalk. – In: KOCKEL, F. (mit Beiträgen von S. BRÜCKNER-RÖHLING, H.-G. RÖHLING & U. FRISCH): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:300 000. Teil 18: Die paläogeographische und strukturelle Entwicklung Nordwestdeutschlands, Band 3: Der Zechstein, die Trias. – BGR-Archiv-Nr. 115557, 82-94; Hannover [unveröffentlicht].
- CARLÉ, W. (1955): Bau und Entwicklung der Südwestdeutschen Großscholle. – Beihefte zum Geologischen Jahrbuch, 16: 272 S.; Berlin.
- EMMERT, U. (1964): Muschelkalk. – In: BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (Hrsg.), Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500000. – 2. Aufl.: 81-90; München.
- FREUDENBERGER, W. (1996): Trias. – In: BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (Hrsg.), Geologische Karte von Bayern 1:500000, Erläuterungen. – 4. Aufl.: 65-89, München.
- FREUDENBERGER, W. (2009): Die Forschungsbohrungen Arnstein 1, Retzstadt 1 und Gramschatz 1 nördlich Würzburg/Unterfranken. – Geologische Blätter für NO-Bayern, 59: 135-172; Erlangen.
- FÜCHSEL, G. C. (1761): Historia terrae et maris, ex historia Thuringiae, per montium descriptionem, eruta. – Acta Academiae electoralis Moguntinae, 2: 44-254, Erfurt.
- GAERTNER, H. (1993): Zur Gliederung des Muschelkalks in Tiefbohrungen anhand von Bohrlochmessungen. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991, 57-64; Korb, Stuttgart (Goldschneck).
- GAERTNER, H. & RÖHLING, H.-G. (1993): Zur lithostratigraphischen Gliederung und Paläogeographie des Mittleren Muschelkalks im Nordwestdeutschen Becken. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991, 85-103; Korb, Stuttgart (Goldschneck).
- HÄRING, M. O. (2001): Technischer Bericht Geothermie-Sondierbohrung Otterbach 2, Basel. – Projekt Deep Heat Mining, Technischer Bericht Otterbach 2: 25 S.; Basel (Geothermal Explorers Ltd).
- KEFERSTEIN, C. (1825): Tabellen über die vergleichende Geognosie. – 60 S.; Halle (Hemmerde & Schwetschke).
- RÖHLING, S. (2000): Der Mittlere Muschelkalk in Bohrungen Norddeutschlands: Fazies, Geochemie, Zyklus- und Sequenzstratigraphie. – Dissertation Martin-Luther-Univ. Halle-Wittenberg, 187 S.; Halle-Wittenberg.
- WOLBURG, J. (1969): Die epirogenetischen Phasen der Muschelkalk- und Keuper-Entwicklung Nordwest-Deutschlands, mit einem Rückblick auf den Buntsandstein. – Geo-tektonische Forschungen, 32: 1-65; Stuttgart.

Manuskript eingegangen: 30.07.2016

Annahme zur Veröffentlichung: 24.10.2016

RÖHLING, H.-G., HAGDORN, H., NITSCH, E., PAUL, J. & FRANZ, M. (2020): Paläogeographie und Klima des Mitteleuropäischen Beckens zur Zeit des Muschelkalks (Anisium, Ladinium). – In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Koordination und Redaktion: HAGDORN, H., SIMON, T., für die Subkommission Perm-Trias): Stratigraphie von Deutschland XIII. Muschelkalk. – Schriftenr. Dt. Ges. Geowiss., 91: S. 41-62, 8 Abb.; Berlin.

1.2

Paläogeographie und Klima des Mitteleuropäischen Beckens zur Zeit des Muschelkalks (Anisium, Ladinium)

[Palaeogeography and climate of the Central European Basin during Muschelkalk times (Anisian, Ladinian)]

Heinz-Gerd Röhling¹, Hans Hagdorn², Edgar Nitsch³, Josef Paul⁴, Simone Röhling⁵ und Matthias Franz⁶

¹ Erich-Baron-Weg 100, 12623 Berlin, e-mail: roehling-geologie@gmx.de

² Muschelkalkmuseum, Schlossstr. 11, D-74653 Ingelfingen, e-mail: encrinus@hagdorn-ingelfingen.de

³ Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Albertstr. 5, 79095 Freiburg i. Br., e-mail: Edgar.Nitsch@rpf.bwl.de

⁴ Geologisches Institut der Universität Göttingen, Goldschmidtstr. 3, D-37077 Göttingen, e-mail: renete.paul@web.de

⁵ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Dienstbereich Berlin, Wilhelmstraße 25-30, 13593 Berlin, e-mail: simone.roehling@bgr.de

⁶ Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen, Abteilung Angewandte Geologie, Goldschmidtstraße 3, 37077 Göttingen, e-mail: mfranz1@gwdg.de

Kurzfassung

Das Mitteleuropäische Becken – auch Germanisches Becken – war während Anisium und frühem Ladinium im Süden und Osten mit dem westlichen Tethysschelf über tektonisch angelegte Meeresspforten verbunden, durch die Wasseraustausch und Einwanderung von Faunen und Floren erfolgten. Es lag bei 20–35° Nord in den Subtropen und erstreckte sich über ca. 1800 km von Mittelengland bis nach Ostpolen und 1200 km von Südschweden bis in die Nordschweiz. Das Depozentrum im Hauptbecken, untergliedert in Südliches Nordseebecken, Norddeutsches und Polnisches Becken, bildete der 500–600 km breite, WNW–ESE verlaufende Abschnitt von der nördlichen Nordsee und Skandinavien im Norden bis zu den Ardennen und den mitteleuropäischen Mittelgebirgen im Süden. Vom nördlichen Zentralbecken reicht eine bis ca. 450 km breite Ausbuchtung als Süddeutsches Becken bis nach Zentralfrankreich (Pariser Becken) und in die Nordschweiz, wo eine Verbindung zum Burgundischen Becken bestand. Intern ist das Süddeutsche Becken durch zahlreiche, meist alt angelegte Schwellen und Senken untergliedert, die sich in Fazies- und Mächtigkeitsunterschieden äußern. Maximale Mächtigkeiten bis über 1000 m erreicht der Muschelkalk in Grabenstrukturen Norddeutschlands und des Nordseebeckens. Breitenlage und paläogeographische Position am Nordwestrand der Neotethys legen ein monsunales Klima nahe. Im Nordsummer strömten in das Hitzetief über Nord-Pangäa feuchtwarme Luftmassen

aus der Tethys ein; im Nordwinter bildete sich über der Landmasse ein stabiles Hoch, aus dem trockener Nordost-Passat zurück zum äquatorialen Bereich strömte. Tempestite belegen Sturmweatherlagen. Der Einfluss des Vindelizisch-Böhmischen Massivs bleibt unklar, weil dessen Höhe in der Mitteltrias nicht bekannt ist. Verstärkter Sedimenteintrag von Norden im höheren Teil des Oberen Muschelkalks legt eine Verschiebung zu semiarid-monsunalen Verhältnissen im Ladinium nahe. Alternativ wird ein zonales Klimamodell diskutiert, das den heutigen Klimazonen der Nordhalbkugel ähnelt.

Abstract

During Anisian and early Ladinian times, the Central European Basin or Germanic Basin was connected to the western Tethys shelf via tectonically structured marine straits in the East and the South. Water exchange and immigrations of floras and faunas followed these passages. The basin was situated between 20 and 35° N in the subtropics and stretched over approx. 1800 km from the English Midlands to East Poland and over 1200 km from South Sweden to North Switzerland. The Main Basin with the depocentre, subdivided in Southern North Sea Basin, North German Basin and Polish Basin and running in WNW–ESE direction, covered a 500–600 km wide area limited by the northern North Sea and Scandinavia in the North and the Ardennes and the European Low Mountain Ranges in the South. The South German Basin, its approx. 450

km wide embayment between Central France and the Bohemian Massif, extends to North Switzerland where it is connected to the Burgundy Basin. Internally, the Central European Basin is subdivided in mostly old-established highs and deeps causing differences of thickness and facies. Maximum Muschelkalk thickness exceeding 1000 m is found in tectonic grabens in North Germany and the southern North Sea. Latitude and palaeogeographic position at the northwestern margin of the Neotethys suggest monsoonal conditions. During northern summer humid and warm air masses from the Tethys streamed to the low over Northern Pangaea. During northern winter a stable high developed above the continent, from which the dry north-easterly trade wind streamed back to the equatorial zone. Tempestites give evidence for storms. It remains unclear to which degree the Vindelician-Bohemian Massif was influential because its altitude in Middle Triassic times is unknown. In the upper part of the Upper Muschelkalk increased sediment influx from the North suggests a shift towards more semi-arid monsoonal climate in Ladinian times. Alternatively, a zonal climate model is discussed more resembling the present-day climatic zones in the northern hemisphere.

Schlüsselwörter: Mitteleuropäisches Becken, Südliches Nordsee-Becken, Norddeutsches Becken, Süddeutsches Becken, Polnisches Becken, Paläoklima, Passatwindssystem

Keywords: Central European Basin, Southern North Sea Basin, North German Basin, South German Basin, Polish Basin, palaeo climate, trade wind systems

1. Einführung

Der Muschelkalk ist die marine mittlere Gruppe der Germanischen Trias, in der sie von den teils terrestrischen, teils marinen Ablagerungen des Buntsandsteins und Keupers unter- und überlagert wird. Da faziell ähnliche marine Sedimente in anderen Nebenbecken der Tethys teilweise ebenfalls als Muschelkalk bezeichnet wurden (Alpiner Muschelkalk, Sephardischer Muschelkalk), wird die mitteleuropäische Typusregion auch als Germanischer Muschelkalk bezeichnet. Die Gesteine der Germanischen Trias wurden in einem großen intrakontinentalen Beckensystem abgelagert, das sich vom heutigen Ostpolen bis in den Nordseeraum und von Südsandinavien bis ins heutige Alpenvorland erstreckte und zumeist als Zentral- oder Mitteleuropäisches Becken bezeichnet wird. In der Literatur ist auch der Name Germanisches Becken verbreitet, der in den nachfolgenden Kapiteln teilweise synonym verwendet wird.

„Germanische Trias“ ist dabei als lithostratigraphischer Begriff für eine Haupt- bzw. Supergruppe (aus

konkreten Gesteinseinheiten) klar von dem geochronologischen Begriff „Trias“ (als einem Zeitabschnitt) zu unterscheiden, mit dem die erdgeschichtliche Periode zwischen 252 und 201 Ma vor heute bezeichnet wird (STD 2016, GTS 2012; Kap. 1.3). Tatsächlich ist der Ablagerungszeitraum der Germanischen Trias nahezu – aber nicht völlig – identisch mit dem der ca. 51 Millionen Jahre (Ma) dauernden Trias. Die ersten Ablagerungen des Buntsandsteins entstanden nach heutiger Kenntnis einige hunderttausend Jahre vor Ende des Perm, die letzten Sedimente des Keupers möglicherweise noch kurz nach Beginn des Jura im Sinne der internationalen Grenzziehung (z. B. BACHMANN & KOZUR 2004, BARTH et al. 2018).

Mit der Trias begann nach dem end-permischen Aussterbeereignis das Mesozoikum. Während der Frühen Trias (Indusium, Olenekium) wurde das Germanische Becken mit überwiegend klastischen Sedimenten des Buntsandsteins aufgefüllt, die eine starke Differenzierung von terrestrischen Konglomeraten und Sandsteinen im Süden gegenüber marin beeinflussten Tonsteinen, Heterolithen und oolithischen Karbonaten im Norden aufweisen. Erste Meereseinbrüche zur Zeit des Buntsandsteins konzentrierten sich in ihrer Verbreitung auf östliche und nördliche Beckengebiete (Übersicht in BECKER 2005, HEUNISCH & RÖHLING 2016, SZULC 2019). Mit Beginn der Mittleren Trias (Anisium, Ladinium) flutete vor ca. 247 Ma das Meer von den westlichen Tethys-Schelfgebieten in mehreren Schüben durch unterschiedliche Pforten weite Teile des Mitteleuropäischen Beckens und hinterließ die regional marin beeinflussten Ablagerungen des Oberen Buntsandsteins und darüber die überwiegend marinen Sedimente des Unteren und des Oberen Muschelkalks. Ein globaler Tiefstand des Meeresspiegels im Anisium schränkte den Meerwasserzufluss in das Becken zeitweise stark ein, weshalb es im Mittleren Muschelkalk zu hypersalinaren Verhältnissen und zur Abscheidung mächtiger Evaporite kam (Übersicht in BACHMANN et al. 2010). Im frühen Ladinium verlandete das Muschelkalkmeer in einem sich schrittweise von Norden vorbauenden Delta und wurde vor etwa 239 Ma durch Playas und Sabkhas des Keupers abgelöst, in die nur noch sporadische Meeresvorstöße vordringen konnten. Die in der Späten Trias (Karnium, Norium) vorherrschenden nichtmarinen (limnischen bis salinaren), nur noch lagenweise und zumeist auf die nördlichen Beckengebiete beschränkten marin-brackischen oder marin-hypersalinaren Ablagerungsbedingungen des Keupers wurden durch die Transgression des Rhätmeeres abgelöst, das sich zum Ende der Trias (Rhaetium) schrittweise von West nach Ost im Germanischen Becken ausbreitete (Übersicht in BARTH et al. 2018).

2. Paläogeographie des Mitteleuropäischen Beckens

2.1 Lage und Entwicklung

Das Mitteleuropäische Becken erstreckt sich über ca. 1800 km von Mittelengland bis nach Ostpolen und 1200 km von Südschweden bis in die Nordschweiz. Der etwa 500–600 km breite Abschnitt von der nördlichen Nordsee und Skandinavien im Norden bis zu den Ardennen und den mitteleuropäischen Mittelgebirgen in Tschechien und Polen im Süden bildete das Depozentrum als Hauptbecken, dessen Achse WNW–ESE verläuft. Zwischen Zentralfrankreich und dem Böhmischem Massiv weist das Germanische Becken eine etwa 450 km breite Ausbuchtung auf, die als Süddeutsches Becken (auch Süddeutsches Teilbecken) bezeichnet wird, das sich um mehr als 400 km nach Süden über Süddeutschland und Nordostfrankreich hinweg bis in

die Nordschweiz erstreckt, wo eine Verbindung zum Burgundischen Becken bestand (z. B. ZIEGLER 1990).

Während der Trias lag das Mitteleuropäische Becken als intrakontinentales Becken im östlichen Randbereich des Pangäa-Kontinents, dem Nordwestrand der Tethys vorgelagert und fast von allen Seiten von festländischen Abtragungsgebieten eingeschlossen (Abb. 1, 2). Nur wenige tektonisch abgesenkte Durchlässe („Pforten“) verbanden das Becken mit anderen Becken des Peritethys-Gebietes sowie mit dem ozeanischen Raum der Tethys. Seit dem Späten Karbon war Mitteleuropa von einer Position in den Tropen nordwärts in den subtropischen Wüstengürtel und die Passatwindzone gewandert und dabei gegen den Uhrzeigersinn rotiert. Von einer Breite von ca. 15° N in der Frühen Trias verlagerte sich Mitteleuropa bis zum Anisium und frühen Ladinium nach ca. 20–35° N, wobei die triaszeitlichen Breitengrade im Vergleich zur heutigen

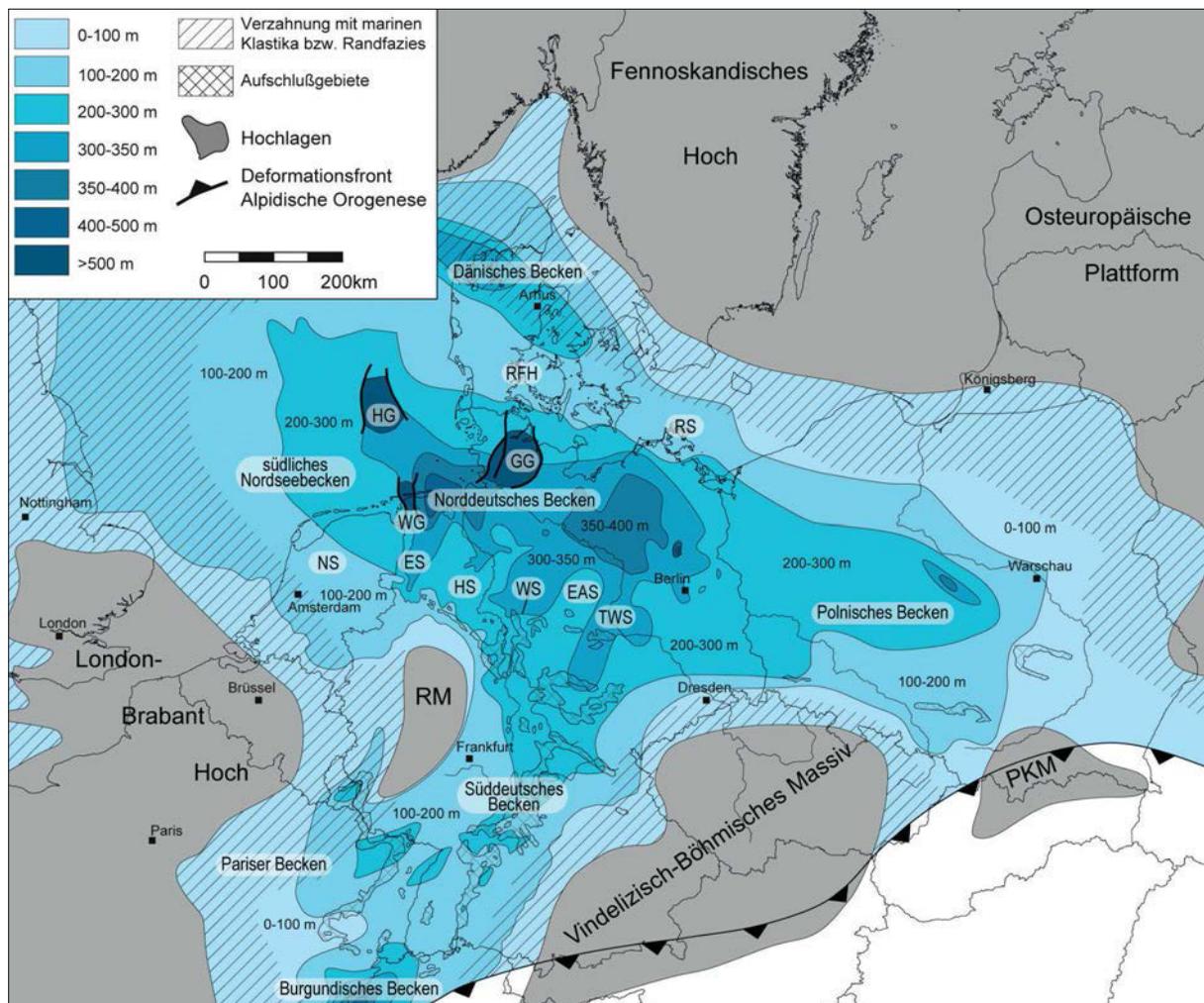


Abb. 1: Vereinfachte Gliederung des Mitteleuropäischen Beckens während der Mittleren Trias und Mächtigkeitsverteilung des Muschelkalks (verändert nach FRANZ et al. im Druck; zusammengestellt nach BOIGK & SCHÖNEICH 1974, ROSENFELD 1978, ALTHEN et al. 1980, ZIEGLER 1990, BEUTLER 1993, 2004, GAERTNER 1993, FREUDENBERGER 1996, IVANOW 1998, DITTRICH 2005, GELUK 2005, RADZINSKI 2008, RUPF & NITSCH 2008, BEER & RUSBÜLT 2010, GeORG-Projektteam 2013, LGRB unveröff.). EAS: Eichsfeld-Altmark-Schwelle; ES: Ems-Senke; HS: Hunte-Schwelle; NS: Niederlande-Schwelle; PKM: Präkarpatisches Massiv; RFH: Ringköbing-Fünen-Hoch; RS: Rügen-Schwelle, TWS: Thüringen-Westbrandenburg-Senke.

Orientierung des Kontinents um etwa 40° rotiert erscheinen und der 25. Breitengrad im frühen Anisium etwa von Emden nach Würzburg verlief (z. B. ZIEGLER 1990, DER COURT et al. 2000; s. Abschn. 3).

Die erste Anlage des Mitteleuropäischen Beckens erfolgte nach der variskischen Orogenese im Späten Karbon und Frühen Perm (Bachmann & Grosse 1989, Bachmann & Hoffmann 1997). Zur Ablagerungszeit von Rotliegend und Zechstein trennte eine Schwellenregion aus Mittel-Nordsee-Hoch und Ringköbing-Fünen-Mön-Hoch noch das Nördliche Permbecken im Bereich der nördlichen Nordsee vom Südlichen Permbecken, das sich von England über die südliche Nordsee und Norddeutschland bis Zentralpolen erstreckte (Ziegler 1990, Doornenbal & Stevenson 2010). Mit dem Aufbrechen von Pangäa im Nordatlantikraum seit dem Späten Perm und der Öffnung des Meliata-Ozeans im Ostalpin erfolgte auch im Mitteleuropäischen Becken zwischen diesen Riftgebieten anhaltende Dehnung und Ausdünnung der kontinentalen Kruste, wodurch auch die Hochgebiete zunehmend abgesenkt und durch die Anlage Nord-Süd verlaufender Gräben (Viking-Graben, Zentral-Graben, Horn-Graben) weiter in einzelne Schwellenlagen zerlegt wurden (Abb. 1, 6, 7).

Damit vereinigten sich Nördliches und Südliches Permbecken zum Mitteleuropäischen Becken, das sich nun von der nördlichen Nordsee bis Südpolen ausdehnte und nach Süden in Frankreich Anschluss an das Burgundische Becken erhielt. Erste marine Ingressionen aus dem Arktischen Ozean erfolgten im Späten Perm (höheres Rotliegend, Zechstein) über das Riftsystem im Nordatlantik und zeigen an, dass die Sedimentoberfläche im Becken zu dieser Zeit bereits unter dem damaligen Meeresspiegel lag (LEGLER & SCHNEIDER 2008, PHARAOH et al. 2010).

Zu Beginn der Trias bildete das Mitteleuropäische Becken ein System aus mehreren, miteinander verbun-

den Teilbecken, die jedoch üblicherweise als „Becken“ bezeichnet werden. Der WNW-ESE orientierte Hauptabsenkungsraum (Südliches Permbecken) verband das Südliche Nordseebecken, das Norddeutsche Becken und das Polnische Becken (Abb. 1). Nördlich davon erstreckte sich das Dänische Becken (Nördliches Permbecken) und südlich davon dehnte sich das Süddeutsche Becken aus. Die Teilbecken werden durch Schwellen bzw. Hochlagen voneinander abgegrenzt (Abb. 2).

Die aus der Verteilung der Sedimentmächtigkeit abgeleitete paläogeographische Strukturierung der Untertrias folgt zunächst noch der des Zechsteins, weshalb die Mächtigkeitskarten viele Ähnlichkeiten aufweisen (vgl. FEIST-BURKHARDT et al. 2008, BACHMANN et al. 2010, RÖHLING & LEPPER 2013). Bereits ältere Mächtigkeits- und Fazieskarten zeigen übereinstimmend, dass während der Trias die generelle WNW-ESE-Erstreckung des Hauptabsenkungsraumes bestehen blieb, jedoch eine zunehmende Segmentierung des Ablagerungsraumes zu erkennen ist (u.a. ZIEGLER 1982, 1990, BERTELSEN et al. 1986). Diese geht auf langgestreckte, z. T. auch verzweigte Grabenstrukturen und andere synsedimentär aktive Störungszonen zurück, die den Sedimentationsraum in Senken und Hochlagen gliederten (SCHRÖDER 1982, ZIEGLER 1982, 1990, Abb. 1 und 2). Bedingt durch die andauernden tektonischen Riftprozesse im gedehnten Krustenbereich zwischen Nordatlantik-Rift und Tethys kam es zur Anlage bzw. Reaktivierung von Störungen und zur Abgrenzung von Teilschollen innerhalb der einzelnen Beckenteile. Deren unterschiedliche Entwicklung spiegelt sich im Buntsandstein sowohl in der Verbreitung, der Mächtigkeit und der Fazies der einzelnen Formationen und Subformationen wider als auch im unterschiedlichen Ausmaß der synsedimentären Hebungs- und Abtragungsprozesse. Im Muschelkalk blieb die Beckenkonfiguration des Buntsandsteins weitestgehend erhalten (Abb. 1).

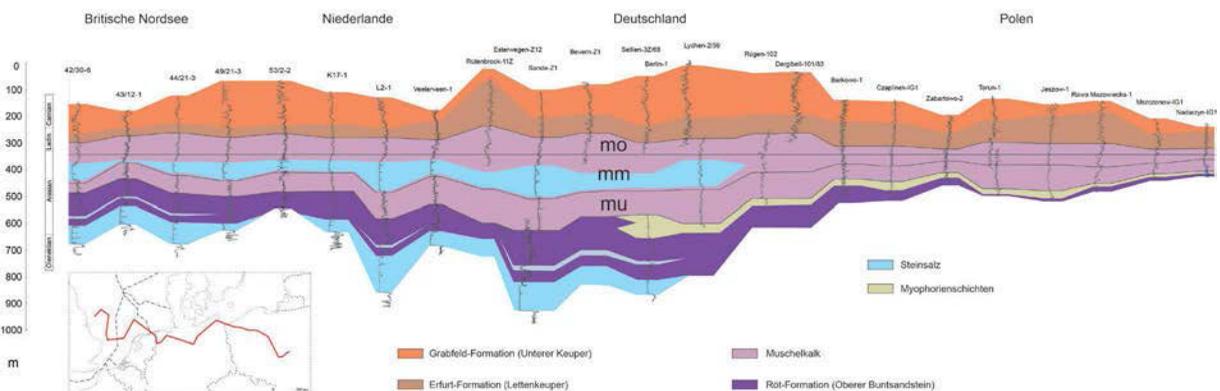


Abb. 2: Korrelationskette (Gamma-Ray-Logs) für den Schichtabschnitt Röt-Formation (Oberer Buntsandstein) bis Grabfeld-Formation (Mittlerer Keuper) zwischen England und Polen (verändert nach GELUK 2005 sowie BACHMANN et al. 2010). Deutlich zu erkennen ist anhand der Mächtigkeitsverteilung die intensive Strukturierung des Gesamtbeckens.

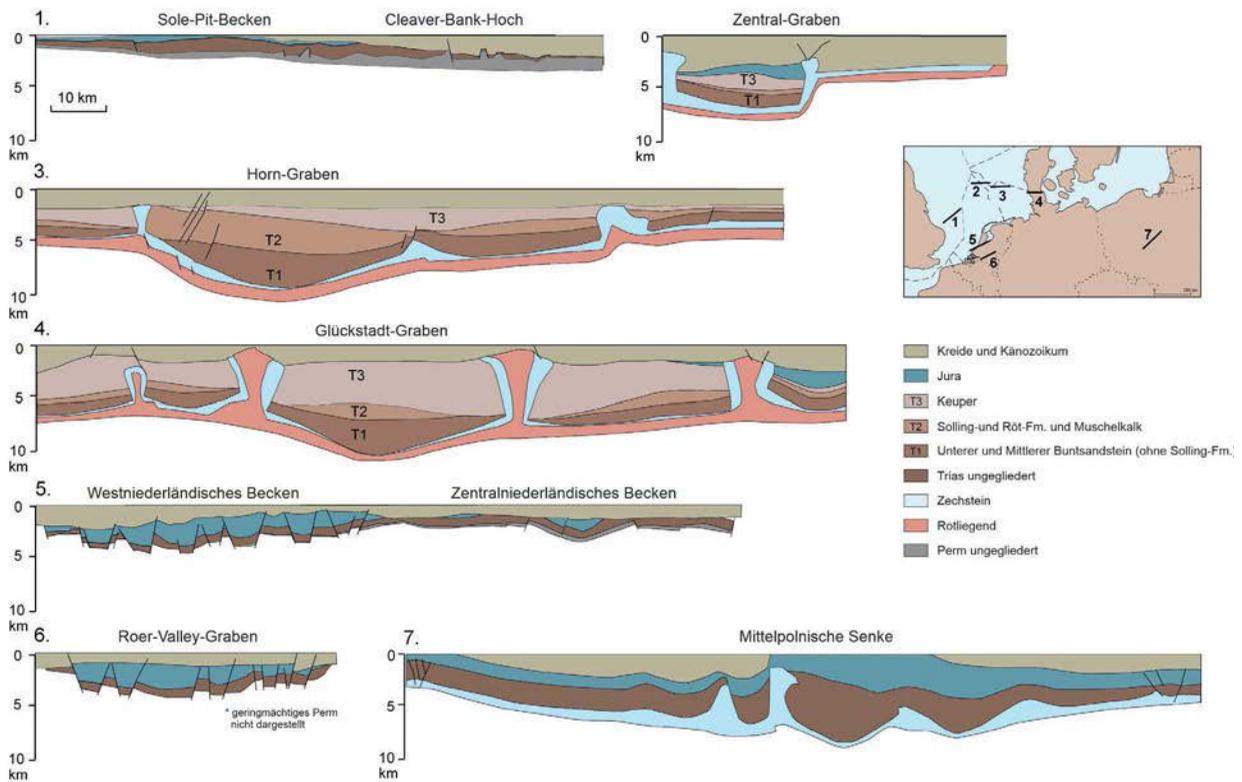


Abb. 3: Geologische Profilschnitte durch verschiedene Teilbecken innerhalb des Mitteleuropäischen Beckens (aus RÖHLING & LEPPER 2013, verändert nach GELUK 2005, CAMERON et al. 1992, KOCKEL 1995, BALDSCHUHN et al. 2001, KRZWIĘC 2004, NITG 2004). Deutlich wird die unterschiedliche Größe der verschiedenen Teilbecken sowie die z. T. stark differenzierte Mächtigkeitsentwicklung der triassischen Schichteinheiten in den Teilstrukturen (z.B. im Horn-, im Glückstadt-Graben oder auch innerhalb des Mittelpolnischen Beckens (Trogess)).

Die Liefergebiete für die klastischen Einträge in das Mitteleuropäische Becken waren im Norden das Fennoskandische Massiv, im Osten die Baltisch-Russische Tafel und im Süden und Osten das Vindelizisch-Böhmische Massiv sowie das Präkarpatische Massiv (Abb. 1). Im Westen des Süddeutschen Beckens lag das Ardennisch-Gallische Massiv, mit dem das London-Brabant-Massiv in der Mittleren Trias noch mit dem Zentralmassiv ein geschlossenes Hochgebiet bildete. Der Nordrand des London-Brabant-Massivs bildete auch die Südwest-Begrenzung des Hauptbeckens, das weiter nördlich in Großbritannien bis an das Penninen- und das Schottland-Hochland (Grampian High) sowie die Westliche und Östliche Shetland-Plattform reichte (ZIEGLER 1990). Innerhalb des Mitteleuropäischen Beckens wirkten sich regionale paläogeographische Strukturen wie die tektonischen Gräben im Nordseegebiet und in Holstein oder Schwelengebiete wie die Eichsfeld-Altmark-Schwelle differenzierend auf Mächtigkeiten und Fazies des Muschelkalks aus. Für den Nord- und Ostrand des Rheinischen Massivs, welches zwischen Saar und Weser in vielen paläogeographischen Karten immer als Hochgebiet dargestellt wird, gibt es keine Hinweise auf klastische Schüttungen in das Muschelkalkbecken (z. B. ROSENFELD 1978); für den Westrand ist dies wegen der Nähe zum

London-Brabant-Massiv schwer zu entscheiden (vgl. Kap. 9.3, 9.4, 9.7, 9.11).

In der ausgehenden Frühen (Olenekium) und Mittleren Trias (Anisium) brachen entlang des Südwestrandes der Osteuropäischen Plattform und am Ostrand des Böhmischen Massivs grabenartige Senken (Pforten) ein und verbanden das Mitteleuropäische Becken mit der Tethys. Im Anisium erfolgte zudem ein Meeresdurchbruch zwischen Vindelizischem Massiv und Zentralmassiv. Transgressionen aus der Tethys machten das Mitteleuropäische Becken nun zu einem weitgehend von Festland eingeschlossenen Nebenmeer, dessen Hydrologie und Ökologie stark von den umliegenden Hochgebieten und ihren Süßwasser-Abflüssen geprägt war. Der Austausch von Floren und Faunen mit dem Tethysraum vollzog sich dabei ausschließlich über die Pforten im Südosten und Süden (Übersicht und weiterführende Literatur in Kap. 1.4). Eine Verbindung zu den borealen Triasmeeren im Norden lässt sich für die Zeit der Muschelkalkablagerung nicht nachweisen. Die ersten Transgressionen erfolgten in der Frühen Trias und zu Beginn der Mittleren Trias aus der Paläotethys durch die Ostkarpatenpforte und erreichten entlang der Teisseyre-Tornquist-Linie den Südosten Polens. Später (Unterer Muschelkalk) verliefen Wasseraustausch und Fauneneinwanderung

durch die Schlesisch-Mährische Pforte, daneben auch durch die Alemannische Pforte. Im späten Anisium und im Ladinium (Oberer Muschelkalk) verlief der Haupteinwanderungsweg über die Alemannische Pforte in der Westschweiz, und zwar von der Neotethys durch das Burgundische Becken (Franche Comté) und die Fränkische und Thüringische Senke einerseits sowie die Nancy-Pirmasens-Senke und die Hessische Senke andererseits. Die in der deutschen geologischen Literatur häufig verwendete Bezeichnung Burgundische Pforte ist mehrdeutig. Denn damit können alle Verbindungen über das Burgundische Becken gemeint sein: die Alemannische Pforte über die Zentralschweiz oder eine südliche Verbindung über die Rhone-Senke, für die südlich Grenoble eine Verbindung zur Tethys zumindest für das späte Ladinium (Unterkeuper, tieferer Mittelkeuper) nachgewiesen ist. Letztere könnte auch im (Oberen) Muschelkalk bereits eine Rolle gespielt haben. Gemäß der Lage der Meeresstraßen ist die Diversität von Fauna und Flora im Röt und basalen Unteren Muschelkalk in der Subkarpatischen Depression und im Heiligkreuzgebirge (Polen) am größten, im höheren Unteren Muschelkalk und im basalen Mittleren Muschelkalk im pfortennahen Oberschlesien, im Oberen Muschelkalk dann in Süddeutschland und Ostfrankreich (Kap. 1.4). In diesen Gebieten finden sich exotische benthische Elemente aus der Tethys, die sich als Einwanderer für eine begrenzte Zeit im Muschelkalkmeer halten konnten, oder als Seltenheiten auch Cephalopoden, die für die biostratigraphische Korrelierung des Muschelkalks mit der tethyalen Mitteltrias eine erhebliche Rolle spielen (URLICHS 1999; Kap. 3.2). Durch ihre breitere Öffnung zur Neotethys zeigt dagegen die Muschelkalkfazies der mitteltriassischen Peritethys-Bereiche in Südfrankreich, Nordwest-Sardinien, Katalonien und auf den Balearen gerade bei den Cephalopoden bis ins späte Ladinium einen stärkeren Einschlag tethyalen Elemente. Diese Gebiete wurden von HIRSCH (1972) im Gegensatz zur Germanischen Trias als Sephardische Trias bezeichnet.

2.2 Interne Konfiguration des Mitteleuropäischen Beckens

2.2.1 Ausdehnung des Muschelkalkmeeres nach Nordwesten

Die Muschelkalktransgression drang zunächst von Osten, später auch von Süden in das Mitteleuropäische Becken (Abb. 1) ein und erreichte mit ihren weitesten Ausläufern den Nordwesten Englands. Ein Dolomithorizont in der Mercia Mudstone Group wird mit einem Teil der Dowsing Dolomitic Formation der südlichen Nordsee gleichgesetzt, in der Röt- und Muschelkalk-

Halite ausgebildet sind (WARRINGTON et al. 1980; Kap. 10.4). Im Nordseeraum lässt sich die nördliche Verbreitung des Muschelkalks wegen spätriassischer Abtragung (altkimmerische Bewegungen) nur schwer fassen. Im nördlichen Dänemark gehen nach ZIEGLER (1990) dolomitische und evaporitische Tonsteine, die dem Muschelkalk entsprechen, in Schwemmfächer-Sedimente über. Durch den schnell subsidierenden Zentral-Graben reichte die Transgression des Muschelkalkmeeres bis nördlich des Ringköbing-Fünen-Hochs; bis in dieses Gebiet lässt sich eine mehrere Meter mächtige Kalksteinbank nachweisen (z. B. BERTELSEN 1978), in der BEUTLER & SCHÜLER (1987) das Äquivalent des Trochitenkalks sehen (MICHELSEN & CLAUSEN 2002). Darüber folgen bunte Tonsteine mit Anhydrit. Weiter nördlich und westlich wird die Mittlere Trias ganz von fluviolakustrinen Sandsteinen und Feinsedimenten vertreten (MCKIE & WILLIAMS 2009). Die zur Zeit der Muschelkalkablagerung subaquatische Rügen-Schwelle zeichnet sich durch starke Mächtigereduktion und Tonsteinfazies, z. T. mit Rotherizonten und Dolomitgestein aus. Nach Norden erstreckte sich das Muschelkalkmeer bis in das südliche Dänische Becken. Noch weiter nördlich laufen die Äquivalente des Muschelkalks in der Redbed-Fazies der Skagerrak-Formation aus (z. B. MICHELSEN & CLAUSEN 2002).

2.2.2 Südliches Nordsee-Becken und angrenzende Gebiete

Das Südliche Nordsee-Becken (Southern North Sea Basin, auch Anglo-Dutch Basin; DAY et al. 1981, CAMERON et al. 1992, GELUK 2005) und die angrenzenden Randgebiete in den Niederlanden, Nordost-Belgien sowie Ostengland nehmen den westlich des Zentral-Grabens gelegenen Teil des Mitteleuropäischen Beckens ein. In diesem Beckengebiet lassen sich verschiedene Teilbecken mit unterschiedlicher Subsidenz und Inversionsgeschichte während Perm und Trias erkennen (DE JAGER 2007, BACHMANN et al. 2010; Abb. 4).

Die Umrahmung dieses Ablagerungsraums bilden das London-Brabant-Massiv im Süden bzw. Südwesten sowie – von Süd nach Nord – das Walisische Massiv, das Penninen-Hoch sowie das Schottland-Hoch (Grampian High) im Westen (GELUK 2005, MCKIE & WILLIAMS 2009; Kap. 10.4). Zwischen den am Westrand gelegenen Hochlagen bestanden im Muschelkalk Verbindungswege zu weiter westlich gelegenen nicht-marinen Triasbecken, die ebenfalls miteinander verbunden waren (Abb. 5). So waren das Wessex-Becken über den Worcester-Graben und die Trias-Becken im Bereich der östlichen Irischen See über das Cheshire-Becken an das Mitteleuropäische Becken angebunden. Das Mid North Sea-Hoch sowie das östlich bzw. südöstlich angrenzende Cleaver Bank-Hoch (BREN-

		UK onshore	UK südliche Nordsee	Niederlande, Belgien	NW-Deutschland
Mittlere Trias	Ladinium	CS Mb Gunthorpe Mb	Dudgeon Fm	Keuper Fm	x2 Erfurt-Formation
	Anisium	Sidmouth Mudstone Fm Radcliffe Mb TFSF	Dowsing Fm MH		Upper Muschelkalk Mb Muschelkalk Evaporite Mb Lower Muschelkalk Mb
		Esk Halite Mb	Röt Halite Mb	Röt Fm	Röt-Formation
		Tarfley Formation	Muschelkalk Halite Member	Buntsandstein (Lower Triassic/Untertrias)	Keuper (Obertrias)
		CS Mb: Cotgrave Sandstone Member			

Abb. 4: Gliederung des Muschelkalks im westlichen Mitteleuropäischen Becken zwischen Nordwestdeutschland und den Britischen Inseln (verändert nach Kap. 10.4).

NAND 1975, DAY et al. 1981) schließen das Südliche Nordsee-Becken gegen den im nördlichen Mitteleuropäischen Becken gelegenen Ablagerungsraum der zentralen Nordsee ab. Das Cleaver Bank-Hoch wird im Osten von der westlichen Randstörung des Zentral-Grabens begrenzt, die auch die Grenze zwischen dem Südlichen Nordsee-Becken und dem Norddeutschen Becken darstellt.

In weiten Bereichen des Südlichen Nordsee-Beckens und auch in den angrenzenden Festlandsgebieten der Niederlande, Nordost-Belgiens sowie Englands ist der Muschelkalk durch mächtige jüngere Sedimentabfolgen verdeckt und nur in den östlichen Niederlanden lokal obertägig aufgeschlossen. Dennoch ist die Kenntnis von der Ausbildung des Muschelkalks in diesem Gebiet gut, da eine Vielzahl von Bohrungen sowohl im Onshore- als auch im Offshore-Bereich Informationen über den Aufbau dieser Schichtenfolge geliefert haben (Kap. 10.4).

Der Muschelkalk erreicht im zentralen Norddeutschen Becken maximale Mächtigkeiten von rund 400 m, im deutschen Teil der Nordsee von etwa 250 bis 300 m. Im niederländischen und britischen Teil der Nordsee werden maximale Mächtigkeiten von etwa 250 m im Broad Fourteens-Becken und im Sole Pit-Becken beobachtet (CAMERON et al. 1992, WARRINGTON & IVIMEY-COOK 1992, JOHNSON et al. 1994, GELUK 1999, 2005, GOLDSMITH et al. 2003, BACHMANN et al. 2010; Kap. 10.4). Lediglich in Dehnungsstrukturen wie dem Zentral-Graben sind – ähnlich wie im Horn- und im Glückstadt-Graben – aufgrund synsedimentärer Bewegungen an den Grabenrandstörungen deutlich höhere Mächtigkeiten reflexionsseismisch nachgewiesen (BALDSCHUHN et al. 2001, KOCKEL 1995). So erreicht der Muschelkalk im Horn-Graben Mächtigkeiten bis 1.000 m (JÜRGENS 1989a, b). Zu den Beckenrändern gehen diese Mächtigkeitswerte kontinuierlich auf weniger als 100 m zurück.

Die Rekonstruktion der Ablagerungsgeschichte und der Beckenentwicklung in den Onshore-Gebieten der Niederlande und im nordöstlichen Belgien ist aufgrund der spät-jurassischen bis früh-kretazischen Hebung (Frühkimmerische Hebung) und der damit verbunde-

nen, z. T. tiefgreifenden Erosion stark eingeschränkt (GELUK 2005, GELUK & RÖHLING 2016; Abb. 5). Gegenüber dem Südlichen Nordsee-Becken kommt der Muschelkalk hier nur in isolierten, invertierten mesozoischen Becken vor, wo infolge der tiefgreifenden Abtragung lediglich Reste des Unteren Muschelkalks mit Mächtigkeiten von maximal etwa 40 m erhalten geblieben sind (Kap. 8.2, 10.4).

Im Ostteil des Südlichen Nordsee-Beckens (niederländische Nordsee) besitzt der Muschelkalk noch seine typische, aus dem Norddeutschen Becken bekannte Ausbildung aus vorwiegend Karbonatgesteinen des Unteren Muschelkalks, Dolomiten, Anhydriten und Steinsalzen des Mittleren Muschelkalks und wiederum Karbonaten des Oberen Muschelkalks. Die Karbonate des Unteren und des Oberen Muschelkalks sind als ausgeprägte oben-fein-Zyklen ausgebildet und besitzen lokal sogar Reservoir-Eigenschaften (Kap. 10.4). Im Mittleren Muschelkalk sind zyklische Evaporitabfolgen mit Halit bis teilweise 100 m Mächtigkeit enthalten. Mächtige Steinsalzlager wurden in Verbindung mit schwacher Dehnungstektonik im niederländischen Teil des Zentral-Grabens sowie in kleineren Gräben im Onshore-Bereich der Niederlande abgelagert (GELUK 1999, GELUK et al. 2000, BORKHATARIA 2004).

In Richtung Ostküste Englands gehen die Mächtigkeiten des Muschelkalks bei relativ raschem Fazieswechsel dann kontinuierlich auf unter 100 m zurück (Kap. 10.4). Bereits im Grenzbereich zwischen dem niederländischen und dem britischen Sektor der Nordsee werden die Karbonate und Evaporite relativ schnell von flachmarinen Mergelsteinen abgelöst, die im Unteren Muschelkalk noch dünne mergelige Kalksteine enthalten können (CAMERON et al. 1992, GELUK 2005, BARNASCH 2010; Kap. 10.4). Diese Fazies findet sich vor allem im britischen Sektor der Nordsee und kann bis in die Triasgebiete Ostenglands verfolgt werden, wo sich dann zum Rand hin Dolomit- und schließlich auch Sandsteine einschalten (Abb. 5; CAMERON et al. 1992, HOWARD et al. 2008, GELUK 2005, McKIE & WILLIAMS 2009). Dieser Übergang von der Karbonat- und Evaporitfazies in klastische Ablagerungen wird in

Kapitel 10.4 beschrieben. Die westlich des Penninen-Hochs gelegenen Triasbecken in der Irischen und Walisischen See zeigen dagegen keine oder nur noch eine geringe marine Beeinflussung (Kap. 10.4). In diesen Gebieten Englands sind zeitäquivalente Sedimente an störungsbegrenzten Becken wie dem Wessex-, dem Worcester- oder dem Cheshire-Becken gebunden. In das Anisium einzustufen sind der Helsby Sandstone, die höchste Einheit innerhalb der Sherwood Sandstone Group (AMBROSE et al. 2014), sowie Schichten im unteren Teil der darüber folgenden Mercia Mudstone Group. Diese umfassen die Tarpley Siltstone Formation sowie den unteren Teil der Sidmouth Mudstone Formation (HOWARD et al. 2008). Der Helsby Sandstone, der diskordant auf Schichten der Untertrias bzw. noch ältere Gesteine übergreift, ist vorwiegend fluviatilen Ursprungs, enthält aber im Cheshire-Becken äolische Sedimente (WARRINGTON & IVEMEY-COOK 1992). Nordwärts geht dieser Sandstein in den intertidalen Tarporley Siltstone (Anisium) über, der zum Sidmouth Mudstone (Anisium bis frühes Karnium) überleitet, welcher Halitablagerungen enthält. Ein Niveau im Sidmouth Mudstone, das mit der Obergrenze des Muschelkalks im Germanischen Becken korrelieren

könnte, ist in den weiter westlich gelegenen Becken bislang nicht nachgewiesen (JACKSON et al. 1997). Im Cheshire-Becken dagegen liegt diese Grenze in einem Tonsteinpaket, welches dem unteren und dem oberen Halit bzw. dem Northwich und dem Wilkesley Halite Member zwischengeschaltet ist (WARRINGTON et al. 1999). Der Sidmouth Mudstone wird überlagert von der spät-karnischen Arden Sandstone Formation.

In den westlichen und südlichen Niederlanden gehen die Karbonate ebenfalls in flachmarine Mergel über. Diese Sedimente prägen die Küstenebenen und die innere Rampe am Beckenrand und sind Ablagerungen eines von Stürmen geprägten, im küstennahen Bereich aber auch immer wieder trockenfallenden Epikontinentalmeeres (GELUK et al. 1996, BORKHATARIA 2004, GELUK 2005, FEIST-BURKHARDT et al. 2008). Da der Muschelkalk zwischen etwa 20° und 30° nördlicher Breite unter relativ ariden Klimabedingungen und einem geringen klastischen Zufluss von den umgebenden Hochlagen abgelagert wurde, sind Klastika nur auf relativ schmale küstennahe Bereiche beschränkt. Im Verlauf des Unteren Muschelkalks griff der marin geprägte Ablagerungsraum immer weiter auf das London-Brabant-Massiv über (GELUK 2005).

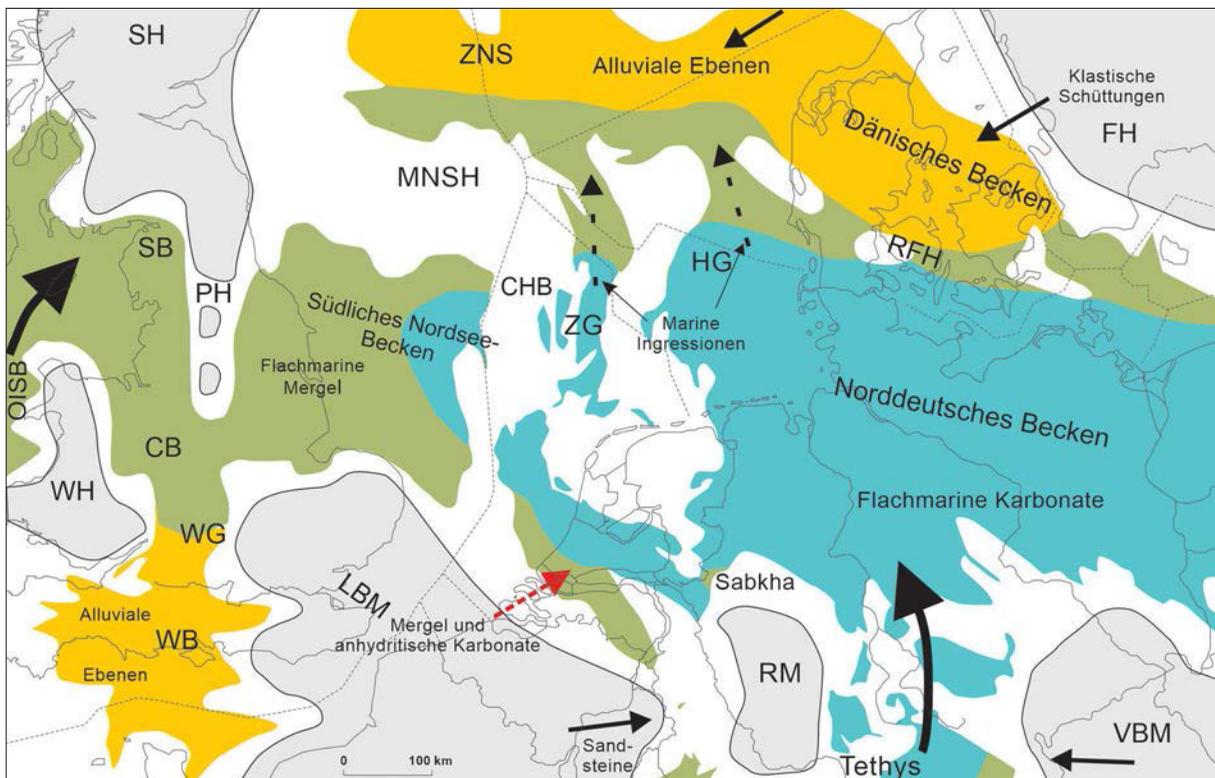


Abb. 5: Heutige Verbreitung des Unteren Muschelkalks (frühes Anisium) im westlichen Mitteleuropäischen Becken und ungefähre Lage der wichtigsten im Beitrag genannten paläogeographischen Strukturelemente. Der dicke Pfeil zeigt die Ingression aus der Tethys über die westlichen Pforten. Verändert aus: Kap. 10.4, nach CAMERON et al. (1992), GELUK (1999, 2005), McKIE & WILLIAMS (2009) und BACHMANN et al. (2010). CB: Cheshire-Becken; HG: Horn-Graben; CHB: Cleaver-Bank-Hoch; FH: Fennskandisches Hoch; LBM: London-Brabant-Massiv; MNSH: Mittel-Nordsee-Hoch; OISB: Ostirische-See-Becken; PH: Penninen-Hoch; RM: Rheinisches Massiv; SB: Solway-Becken; SH: Schottland-Hoch; VBM: Vindelizisch-Böhmisches Massiv; WB: Wessex-Becken; WG: Worcester-Graben; WH: Walisisches Hoch; ZNS: Zentrale Nordsee-Senke; ZG: Zentral-Graben.

2.2.3 Norddeutsches Becken

Im Norddeutschen Becken ist der Muschelkalk, von wenigen lokalen Aufragungen abgesehen, z. T. bis mehrere 1000 m tief versenkt und nur durch Bohrungen aufgeschlossen. Als Norddeutsches Becken wird hier der Teil vom Hauptabsenkungsraum des Mitteleuropäischen Beckens verstanden, der sich in WNW–ESE-Richtung vom Cleaver Bank-Hoch bis zur Stettin-Kalisz-Ostbrandenburg-Schwelle erstreckt (vgl. Kap. 9.1). Lithologie und Fazies des Muschelkalks, aber auch des unterlagernden Buntsandsteins, entsprechen auch in weiten Teilen des Südlichen Nordsee-Beckens und des Polnischen Beckens den Verhältnissen im Norddeutschen Becken (GELUK & RÖHLING 1997, 1999, 2013, GELUK 2005; Kap. 10.4, 10.5).

Das Norddeutsche Becken war schon in der Frühen Trias intensiv in Schwellen, Senkungszonen sowie Grabenstrukturen gegliedert (RÖHLING 2013, GELUK & RÖHLING 1997, 1999, KOCKEL et al. 1999, RÖHLING & LEPPER 2013; Abb. 1, 2). Diese Strukturelemente beeinflussten bereits die Fazies- und Mächtigkeitsverteilung des Zechsteins, und hier vor allem der Ohre-, Friesland und Fulda-Formation (BEST 1988, 1989, RÖHLING 2013, GELUK 1999, 2005). Im Mittleren Buntsandstein erreichten die tektonischen Bewegungen dann einen ersten Höhepunkt, wie dies u. a. durch die beckenweit verfolgbaren V-, D- und H-Diskordanzen und die mit ihnen verbundenen Schichtlücken dokumentiert wird (RÖHLING 2013, GELUK & RÖHLING 1997, 1999, KOCKEL et al. 1999). Im Oberen Buntsandstein treten diese Strukturelemente zwar nicht mehr so markant in Erscheinung, sind aber dennoch weiterhin wirksam. Auch im Muschelkalk steuerten diese Strukturelemente nachweislich die Sedimentation und Fazies.

Zu den wichtigsten Strukturelementen am Südrand des Norddeutschen Beckens gehören von West nach Ost: Niederlande-Schwelle, Niederrhein- und Ems-Senke, Hunte-Schwelle, Weser-Elbe-Hoch, Weser-Senke und die südlich daran anschließende Hessische Senke, Eichsfeld-Altmark-Schwelle, Thüringen-Westbrandenburg-Senke und ganz im Osten die Stettin-Kalisz-Ostbrandenburg-Schwelle. Dabei grenzt die letztgenannte Struktur das Norddeutsche gegen das Polnische Becken ab (Abb. 1, s.a. RÖHLING 2013; Abb. 8.1.2-1).

Auch im zentralen Norddeutschen Becken bestimmen die aus dem Buntsandstein bekannten Strukturelemente das Sedimentationsgeschehen: Zentral-Graben, Schillgrund-Hoch und Ost-Nordsee-Hoch, Horn-Graben und seine südliche Verlängerung in die Ems-Senke, Helgoland-Becken, Glückstadt-Graben und dessen südliche Verlängerung in den Bremen-Graben sowie die Holstein-Meck-

lenburg-Senke (Abb. 1, s.a. Röhling 2013; Abb. 8.1.2-1). Die Borkum-Schwelle, die vor allem im Mittleren Buntsandstein das Helgoland-Becken in ein westliches und ein östliches Teilbecken untergliedert, existiert zur Muschelkalkzeit vermutlich nicht mehr bzw. ist als solche kaum noch zu erkennen.

Die nördliche Beckenbegrenzung folgt einer langgestreckten Schwellenzone, die aus mehreren Einzelstrukturen besteht. Von West nach Ost sind zu nennen: Mid-North-Sea-Hoch, Ringköbing-Fünen-Hoch bzw. -Schwelle, Stevns-Block sowie Rügen-Schwelle (Abb. 1). Hierbei handelt es sich um subaquatische Hochlagen mit z. T. deutlich reduzierten Mächtigkeiten und gravierenden Faziesveränderungen (BERTELSEN 1980, BEUTLER 1993, MICHELSEN & CLAUSEN 2002). Unterbrochen werden diese Hochlagen von Grabenstrukturen wie dem Zentral-Graben und dem Horn-Graben. Inwieweit die aus dem Buntsandstein anhand leicht erhöhter Mächtigkeiten erkennbare Brande-Senke (bzw. Brande-Graben) und auch die Slagelse-Senke (RÖHLING 2013; Abb. 8.1.2-1) im Muschelkalk wirksam waren, ist bislang nicht geklärt. Im Süden stellen die Thüringische Senke und die Hessische Senke die Verbindung zum Süddeutschen Becken her.

Zu diesen aus dem Buntsandstein bekannten Großstrukturen kommen im Muschelkalk auch neue Strukturen hinzu bzw. zuvor nur kurzzeitig aktive Strukturen werden reaktiviert. So wird beispielsweise der im Bereich des heutigen Ems-Mündungsgebietes gelegene, kurz vor Beginn des Mittleren Buntsandsteins erstmals aktive Westdorf-Graben im Mittleren Muschelkalk reaktiviert; er liegt paläogeographisch an der Schnittstelle zwischen südlichem Horn-Graben, Ostabdachung der Niederländischen Schwelle sowie nördlicher Ems-Senke (BRÜCKNER-RÖHLING 2002, RÖHLING 2013; Kap. 10.4). Möglicherweise haben auch erste halokinetische Bewegungen im Zechstein lokal zu Salzabwanderungen bzw. -akkumulationen geführt und damit das paläogeographische Muster des zentralen Muschelkalkbeckens zusätzlich differenziert.

Der nördliche Abschnitt der Weser-Senke und die Holstein-Mecklenburg-Senke bilden die Hauptabsenkungsgebiete innerhalb des Norddeutschen Beckens, in denen der Muschelkalk jeweils über 400 m mächtig ist (Abb. 1). Durch Grabenbildung und Salztekonik sind die Mächtigkeiten des Muschelkalks lokal stark erhöht. Maximale Mächtigkeiten werden im Glückstadt-Graben nördlich Hamburg und im Horn-Graben in der östlichen Nordsee erreicht, die jeweils etwa 3000 m und 4000 m mächtige Muschelkalk-Sedimente aufnahmen (BALDSCHUHN et al. 2001). Gegen die Ränder des Norddeutschen Beckens nehmen die Mächtigkeiten sukzessive ab. Gleiches gilt für beckeninterne

Hochlagen wie die Eichsfeld-Altmark-Schwelle oder die Rügen-Schwelle (Abb. 1). Über die Thüringen-Westbrandenburg-Senke setzt sich der Muschelkalk mit Mächtigkeiten von über 300 m bis in das Subherzyn und nach Thüringen fort (BEUTLER 1993, RADZINSKI 2008).

Während der Mittleren Trias ist anhand der Mächtigkeits- und Faziesverteilung eine Verlagerung des Depozentrums innerhalb des Mitteleuropäischen Beckens von Ost nach West zu erkennen. Zur Zeit des Oberen Buntsandsteins und des Unteren Muschelkalks (Aegaeum bis frühes Illyrium) lag das Depozentrum im Polnischen Becken, wie auch schon im Unteren und Mittleren Buntsandstein (Kap. 10.5). Im Verlaufe des Mittleren Muschelkalks (Illyrium) verlagerte es sich dann zunehmend in das westliche Norddeutsche Becken, wie dies u. a. anhand der Anzahl und Mächtigkeiten der eingeschalteten Steinsalzlager deutlich wird (GAERTNER & RÖHLING 1993, BRÜCKNER-RÖHLING 2002). Zur Zeit des Oberen Muschelkalks und des Unteren Keupers (spätes Illyrium bis Longobardium) erstreckte sich das Depozentrum über das gesamte Norddeutsche Becken. Dies wird durch erhöhte summarische Mächtigkeiten des Oberen Muschelkalks und Unteren Keupers von bis zu 150 m und darüber belegt (z. B. BEUTLER 1995, FRANZ et al. im Druck). Bei alleiniger Betrachtung des Oberen Muschelkalks, wird durch den stark diachronen Muschelkalk/Keuper-Fazieswechsel und den hohen feinklastischen Anteil der Tonplattenfazies im Norddeutschen Becken eine Verlagerung des Subsidenzzentrums in das Süddeutsche Becken vorgetäuscht (FEIST-BURKHARDT et al. 2008).

2.2.3 Süddeutsches Becken

Unter dem Begriff Süddeutsches Becken werden die Bereiche des Mitteleuropäischen Beckens zusammengefasst, die südlich an das zentral gelegene Norddeutsche Becken anschließen (Abb. 6). Das Süddeutsche Becken wird im Nordwesten durch das London-Brabant-Massiv und das Rheinische Massiv begrenzt, im Südosten durch das Vindelizische und im Osten das Böhmisches Massiv. In der Mitteltrias setzte sich das London-Brabant-Massiv als Ardennisch-Galliches Massiv nach Süden als Hochgebiet bis in den Bereich des heutigen Französischen Zentralmassivs fort. Der Sedimentationsraum zwischen diesen Abtragungsgebieten umfasst einen in Süddeutschland bis 450 km breiten, SW–NE streichenden Senkungsraum, der das Norddeutsche Becken mit dem Burgundischen Becken im Osten Frankreichs und in der Westschweiz verbindet (BOIGK & SCHÖNEICH 1974).

Das Süddeutsche Becken zeichnet sich im Vergleich zum Hauptbecken durch verringerte Mächtigkeiten aus, die zwar in mehreren Teilsenken Werte zwischen 250 und 300 m erreichen, sonst aber meist zwischen

100 und 250 m liegen und gegen die Beckenränder auf null zurückgehen. Die regionale Mächtigkeitsverteilung belegt eine strukturelle Gliederung in unterschiedlich orientierte Schwellenzüge mit geringerer und Senken mit höherer Subsidenz, die teilweise auch Einfluss auf die Faziesverteilung hatten (Kap. 6.2). Die Position dieser Strukturen ist dabei vielfach in den Mächtigkeitskarten vom Zechstein bis in den Jura erkennbar und teilweise mit der Verbreitung von intramontanen (innervariskischen) Permokarbon-Becken korreliert (BOIGK & SCHÖNEICH 1974, RUPF & NITSCH 2008). Das Hauptstreichen der meist langgezogenen Schwellen folgt dabei im Westen meist einer SW–NE-Richtung, im zentralen Abschnitt mehr einer SSW–NNE und SSE–NNW Orientierung und im Osten NW–SE-Richtungen.

Westlich des Rheins liegt vor dem Ardennisch-Gallichen Massiv im Dreiländergebiet von Luxemburg, Frankreich und Deutschland die Muschelkalk-Senke der Trierer Bucht zumindest teilweise über dem Permokarbon des Wittlich-Beckens und ist strukturell kleinräumig stark differenziert (DITTRICH 1989, im Druck). Diese Struktur stellt den südlichen Ausläufer der Eifeler Nord-Süd-Zone dar, durch die das Süddeutsche Becken zwischen Rheinischem Massiv und Ardennen mit dem Norddeutschen Becken verbunden war. Für Buntsandstein und Unteren Muschelkalk ist dies durch Erosionsrelikte belegt, für den höheren Muschelkalk und Keuper durch die Fazies. Südöstlich der Trierer Bucht ist diese Senke von der größeren Nancy-Pirmasens-Senke durch die SW–NE streichende Sierck-Schwelle getrennt, über der die Muschelkalk-Mächtigkeiten deutlich reduziert sind. Sie ist als nach Südwesten abtauchende Fortsetzung der Taunus-Hunsrück-Hochlage am Südrand des Rheinischen Massivs zu betrachten (Kap. 9.11, 9.12, 10.2; Abb. 6).

Die Nancy-Pirmasens-Senke ist ihrerseits über dem permokarbonen Saar-Nahe-Becken angelegt, ohne dessen Ränder exakt abzubilden. Die nordöstliche Fortsetzung dieser Senkungsstruktur vor dem SE-Rand des Rheinischen Massivs liegt außerhalb des heutigen Verbreitungsgebiets des Muschelkalks, doch sprechen die faziellen Verhältnisse im Buntsandstein und Muschelkalk für eine einstige Verbindung über die Hessische Senke nach Norddeutschland, die von der Haardt-Odenwald-Spessart-Schwelle teilweise von den weiter südöstlich liegenden Gebieten getrennt war. Nach Südwesten und Süden wird die Nancy-Pirmasens-Senke in Nordost-Frankreich von der WSW–ENE streichenden Morvan-Vogesen-Schwelle begrenzt, die sich in den Vogesen in die SW–NE streichende Haardt-Odenwald-Spessart-Schwelle einerseits und die WSW–ENE streichende Nordschwarzwald-Schwelle andererseits

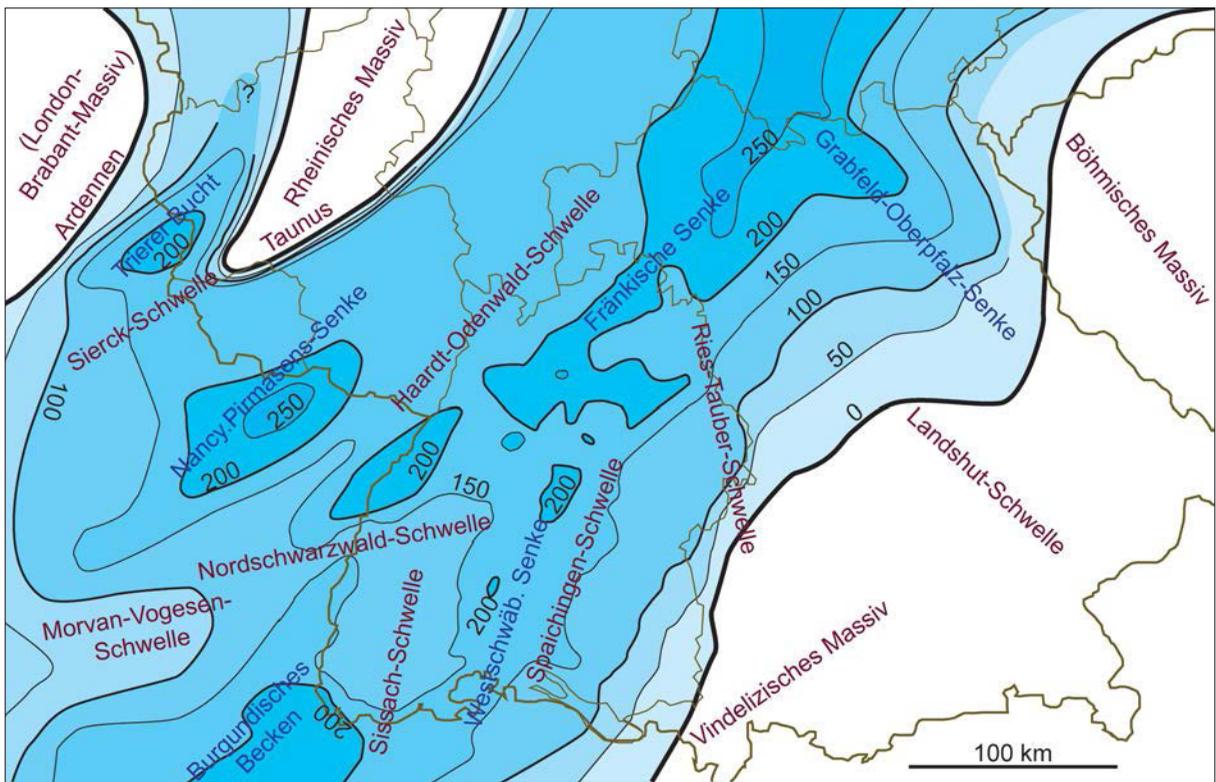


Abb. 6: Mächtigkeitsverteilung des Muschelkalks und paläotektonische Gliederung des Süddeutschen Beckens in stärker subsidierende Senken und weniger subsidierende Hochlagen bzw. Schwellen, zusammengestellt nach BOIGK & SCHÖNEICH (1970), FREUDENBERGER (1996), DITTRICH (2005), RUPF & NITSCH (2008), GEORG-Projektteam (2013) sowie LGRB (unveröff.).

aufspaltet. Südlich der Morvan-Vogesen-Schwelle schließt sich das Burgundische Becken im Gebiet des späteren Dannemarie- und Rhone-Grabens an, in dem erneut mehrere hundert Meter Muschelkalkmächtigkeit erreicht werden (Abb. 6). Sie sind heute jedoch teilweise von der alpinen Überschiebungstektonik im Umfeld des Faltenjura überprägt. Ein nördlicher Ausläufer dieses Beckens ist im Gebiet des südlichen Oberrheingrabens als Badische Senke bis in den Bereich der Nordschwarzwald-Schwelle nachgewiesen (GeORG-Projektteam 2013).

Östlich des Burgundischen Beckens liegen mehrere SSW–NNE-streichende Schwellen und Senken ungefähr parallel zum östlichen Beckenrand am Vindelischen Massiv, das heute unter den alpinen Decken und dem vorgelagerten Molassebecken verborgen ist. Von West nach Ost sind dies die vom Tafeljura bis in das Gebiet des Zentralschwarzwaldes streichende Sissach-Schwelle, die Westschwäbische Senke im Gebiet des oberen Neckars, die im Muschelkalk als „Schwäbische Straße“ ein wichtiger Faunenwanderweg war (FRANK 1931), und die Spaichingen-Schwelle im Untergrund der Westalb, deren Randstörungen im Grundgebirge offenbar noch heute seismisch aktiv sind (Albstadt-Störungszone). Diese drei Strukturen treten erstmals im Zechstein als Ausbuchtungen des Beckenrandes und in den Mäch-

tigkeitsverteilungen in Erscheinung und sind, soweit Ablagerungen erhalten sind, bis in den Oberjura hinein nachweisbar. Lediglich die erst vom höheren Mittelkeuper an auffällige Mittelschwäbische Senke östlich der Spaichingen-Schwelle tritt im Muschelkalk noch nicht in Erscheinung.

Die nördliche Begrenzung dieser Schwellenlagen liegt in der Verlängerung der Nordschwarzwald-Schwelle etwa am Südrand des permokarbonen Kraichgau-Beckens. Über diesem entwickelte sich im Mesozoikum die Fränkische Senke, die vom mittleren Oberrheingraben um Straßburg über den Kraichgau und das Main-Tauber-Gebiet südlich der Haardt-Odenwald-Spessart-Schwelle bis nach Unterfranken streicht und von dort über die Thüringische und die Hessische Senke an das Norddeutsche Becken angebunden war.

Mit der Ries-Tauber-Schwelle, die angenähert mit der Landesgrenze zwischen Baden-Württemberg und Bayern zusammenfällt, schwenkt die Hauptrichtung der Beckenstrukturen auf SSE–NNW um. Diese vom Perm bis mindestens in die Kreide wirksame Schwellenlage trennt – ähnlich wie die weiter nördlich gelegene Eichsfeld-Altmark-Schwelle – Gebiete mit unterschiedlich orientiertem Hauptstreichen. Während westlich der Ries-Tauber-Schwelle Senken und Schwellen meist SW–NE ausgerichtet sind, streichen die mesozoischen und auch älteren Strukturen östlich

davon vorwiegend SE–NW. Im Muschelkalk trennt sie die nordwürttembergische von der mittelfränkischen Ausbildung und zeigt sich im Oberen Muschelkalk in der Fazies deutlich als synsedimentäre Hochlage durch die Ausbildung von Hartgründen und Crinoidenbiohermen (Crailsheim-Subformation der Trochitenkalk-Formation) und küstenferne Schillbarren der Quaderkalk-Formation (Kap. 8.4).

Auch die erst vom Keuper an deutlicher erkennbare Mittelfränkische Senke ist im Muschelkalk nur schwach durch leicht erhöhte Mächtigkeiten unmittelbar östlich der Ries-Tauber-Schwelle (Bad Windsheim, Treuchtlingen) ausgeprägt. Sie trennt diese Schwelle nur undeutlich von der Landshut-Schwelle im Untergrund der Fränkischen Alb. Erst entlang der Fränkischen Linie, die heute als alpidisch-saxonische Bruchstruktur den Südwestrand der Böhmisches Masse bildet, zeigt sich über dem permokarbonen Naab-Becken eine weitere SE–NW streichende Senke im Grabfeld und in der Oberpfalz. Die hier mächtig ausgebildete klastische Randfazies des Muschelkalks (Grafenwöhr- und Eschenbach-Formation) weist diese als Randsenke unmittelbar vor den Abtragungsgebieten des Böhmisches Massivs aus.

Vergleicht man die Mächtigkeitsverteilungen im Deckgebirge vom Zechstein bis in das Mesozoikum, fällt einerseits die Lagekonstanz der genannten Schwellen- und Senkenbereiche auf, andererseits werden aber auch Abweichungen im genauen Verlauf der Isopachen und der Schwellen-Senken-Übergänge sichtbar. Offenbar waren die Schwellengebiete nicht an einzelne Störungen gebunden, sondern an breite Störungszonen im Grundgebirge, deren Scherzonen zu unterschiedlichen Zeiten aktiv waren. Die Randbereiche der Schwellen („Isopachenhänge“) variieren ihre Lage daher über die Gruppen des Deckgebirges hinweg um mehrere Kilometer und damit mehr, als angesichts der meist engmaschigen Datenlage im Ausstrichgebiet als Artefakt der Konstruktion aufgefasst werden könnte. Mesozoische tektonische Bewegungen im Grundgebirge sind für die Trias jedenfalls aus Störungszonen im Kristallin des Schwarzwaldes durch direkte Datierung von prä- und syntektonischen Mineralisationen belegt (WERNICKE & LIPPOLT 1997, BRANDER & LIPPOLT 1998).

2.2.4 Polnisches Becken

Das Polnische Becken umfasst den östlichen Teil des Mitteleuropäischen Beckens, dessen Umrahmung vom Fennoskandischen Hoch im Norden, von der Osteuropäischen Plattform im Osten und Südosten sowie vom Präkarpaten-Massiv und Böhmisches Massiv im Süden bzw. Südwesten gebildet wird. Von diesen Hochlagen stammt der klastische Eintrag in das Becken. Die Begrenzung

gegen das Norddeutsche Becken bildet im Nordwesten die größtenteils in Polen liegende und bereits in der Frühen Trias wirksame Stettin-Kalisz-Ostbrandenburg-Schwelle bzw. das Stettin-Wollstein-Hoch, welches auch nach Ostbrandenburg (Ostbrandenburg-Schwelle) hineinreicht (SZYPERKO-SŁIWZYŃSKA 1979, SZYPERKO-TELLER & MORYC 1988, DADLEZ et al. 1998, PUFF & RADZINSKI 2013, RÖHLING & LEPPER 2013; Abb. 7). Im Südwesten stellen die Niederschlesien-Senke sowie die dem Vindelizisch-Böhmisch(-Sudetischen)-Massiv vorgelagerte Vorsudetische Monoklinale eine Verbindung zur Lausitz-Senke bzw. zur ehemals vorhandenen Randfazies in Sachsen dar.

Der Muschelkalk ist in weiten Teilen Polens in der klassischen dreigliederten Fazies der Germanischen Trias verbreitet (Kap. 10.5). Die mitteltriassischen Gesteine wurden in einem Gebiet von der Subkarpaten-Senke bis zur Ostsee abgelagert. Die Triasvorkommen in der Hohen Tatra entstanden dagegen bereits außerhalb des Mitteleuropäischen Beckens auf dem Schelf der Tethys. Die heute verfügbaren Informationen über die Mitteltrias in Polen stammen aus zahlreichen Aufschlüssen in Nieder- und Oberschlesien, im Krakauer Hügelland sowie im Heiligkreuzgebirge, wo die Gesteine des Muschelkalks übertägig verbreitet sind, und aus zahlreichen Bohrungen und reflexionsseismischen Profilen. Die paläogeographische Lage am Ostrand des Mitteleuropäischen Beckens und die direkte Anbindung der polnischen Triasgebiete über die Ostkarpaten- und die Schlesisch-Mährische Pforte an die Tethys führen zu deutlichen Unterschieden in Fazies und Fossilführung zu den zeitgleichen Sedimenten im westlich angrenzenden Norddeutschen Becken (Kap. 10.5).

Bei den nachfolgenden Angaben zu den Mächtigkeiten des Muschelkalks (Abb. 7) ist zu berücksichtigen, dass die Abgrenzung des Muschelkalks von der in Deutschland üblichen Praxis abweicht. So wird die Untergrenze in Polen tiefer gezogen, nämlich an der Basis der Unteren Gogolin-Formation, die der Basis der Dornburg-Subformation (Röt-Formation, Oberer Buntsandstein) entspricht, während die Obergrenze des Muschelkalks in Nordwest-Polen bereits mit dem Einsetzen der feinklastischen Fazies im Bereich der Folge m8 gezogen wird (Kap. 8.1 und 10.5). Der Untere Muschelkalk erhält damit entsprechend höhere Mächtigkeitswerte, der Obere Muschelkalk geringere. Wie aus der Mächtigkeitskarte für den Muschelkalk in Polen deutlich wird, bilden die Mittelpolnische Senke (Mid-Polish Trough, s. a. SZYPERKO-TELLER & MORYC 1988; Abb. 6, GAJEWSKA 1997, DADLEZ et al. 1998; Kap. 10.5; Abb. 2) und die Niederschlesien-Senke die Beckenbereiche mit den größten Absenkungs- und Akkumulationsraten.

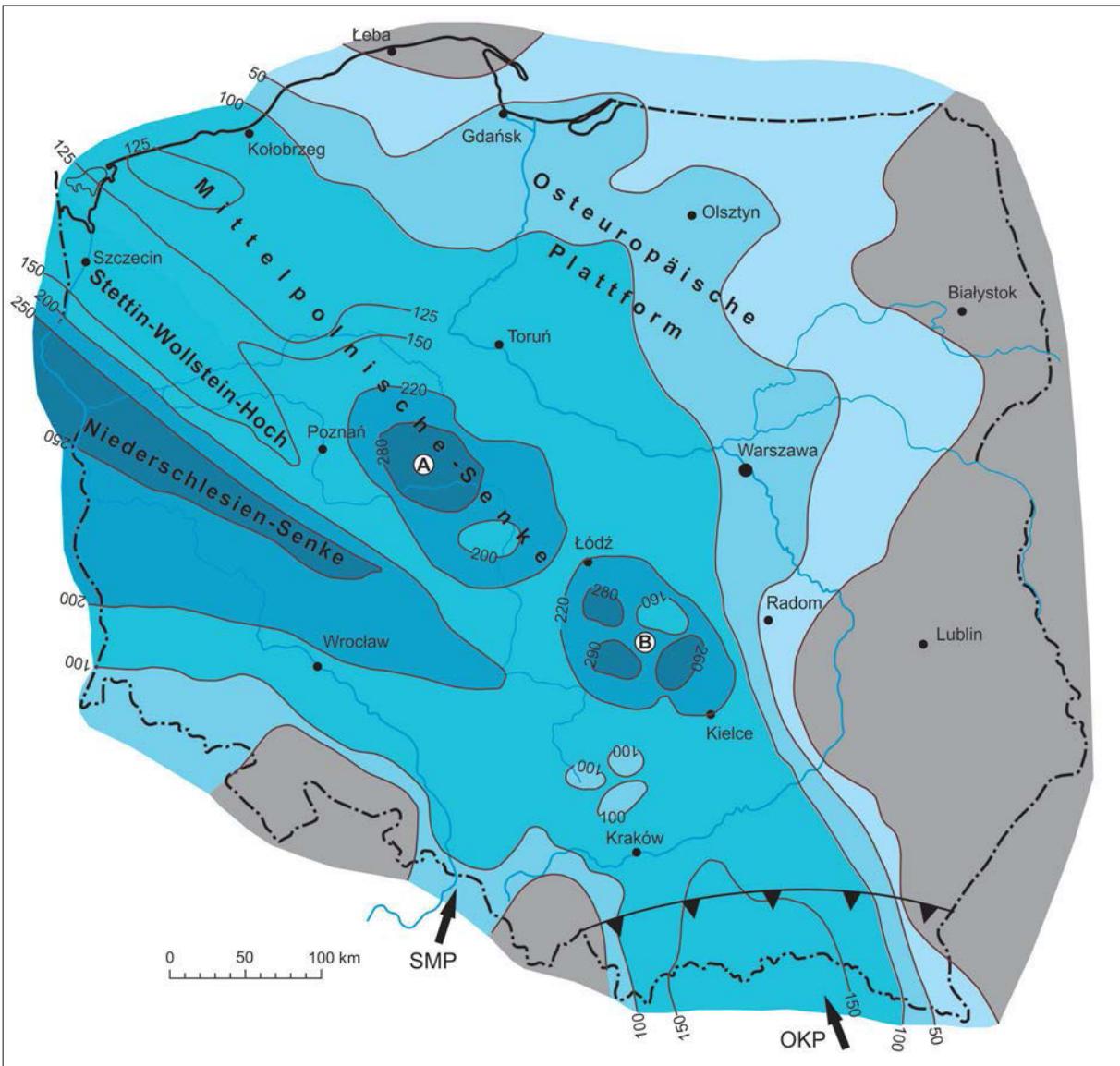


Abb. 7: Schematische Darstellung der erbohrten Mächtigkeiten des Muschelkalks in Polen. Die Muschelkalk-Mächtigkeiten im südlichsten Polen (Untergrund der Karpaten) werden nach dem Faziesmuster in Oberschlesien und dem Karpatenvorland interpretiert (aus Kap. 10.5). Beim Vergleich mit Abb. 1 ist zu berücksichtigen, dass die Unter- und Obergrenze des Muschelkalks von den Grenzziehungen in Deutschland abweicht. A: mittlere Mittelpolnische Senke; B: südliche Mittelpolnische Senke; SMP: Schlesisch-Mährische Pforte; OKP: Ostkarpaten-Pforte.

Die Mittelpolnische Senke war während Perm und Trias das dominierende Strukturelement im Polnischen Becken. Es entwickelte sich über dem Teisseyre-Tornquist-Lineament, das den Südwestrand des Fennoskandischen Hochs sowie der Osteuropäischen Plattform begleitet. Dabei führten die Kombination von transtensionalen Bewegungen entlang dieses tektonischen Lineamentes und fortgesetzter Abkühlung der Unterkruste zu hohen Subsidenzraten (DADLEZ et al. 1995, VAN WEES et al. 2000). Für das Späte Perm und die Frühe Trias ist diese Senke – bei einer Breite von lediglich 50 bis 75 km – in NNW–SSE-Richtung über annähernd 500 km quer durch Polen zu verfolgen. Sie ist gegenüber den angrenzenden Beckenbereichen durch deutlich höhere Mächtigkeiten und

stratigraphisch vollständigere Abfolgen für Perm und Trias charakterisiert. So erreicht beispielsweise allein der Zechstein teilweise Mächtigkeiten bis über 1.500 m, das Schichtpaket Unterer/Mittlerer Buntsandstein bis über 1.600 m (DADLEZ et al. 1998: Pl. 14). Diese Abfolge ist dagegen östlich der Mittelpolnischen Senke, auf der Osteuropäischen Plattform, sowie in den westlich angrenzenden Arealen lediglich 300 bis 450 m mächtig (DADLEZ et al. 1998, DADLEZ 2003). Nur in der Subsidenzachse der Niederschlesien-Senke werden mit bis über 550 m etwas höhere Werte erreicht (DADLEZ et al. 1998). Ursache für die z. T. extreme Mächtigkeitsdifferenzierung des Buntsandsteins sind – neben primären Subsidenzunterschieden – wie im Norddeutschen Becken tektonische Aktivitäten sowie

die damit verbundenen Erosionsdiskordanzen (BECKER 2005, RÖHLING 2013, RÖHLING & LEPPER 2013, LEPPER et al. 2013). Diese Entwicklung setzt sich im Muschelkalk weiter fort. Das Schichtpaket Röt bis Unterer Keuper erreicht in der Mittelpolnischen Senke Mächtigkeiten von 400 bis 600 m, lokal sogar bis über 1.400 m (DADLEZ et al. 1998: Pl. 20), während auf den angrenzenden Hochlagen wie der Osteuropäischen Plattform Maximalmächtigkeiten von etwa 400 m und im Bereich des im Westen angrenzenden Stettin-Wollstein-Hochs (Szczecin-Wolzstyn-High, Woiwodschaft Wielkopolskie) von etwa 450 m (DADLEZ et al. 1998: Pl. 20) erreicht werden.

Im Muschelkalk ist die Mittelpolnische Senke zwar noch in Bereiche mit unterschiedlichen Bewegungsmustern differenziert, jedoch ist eine Verlagerung des Subsidenzzentrums in den Süden der langgestreckten Senkungszone festzustellen. Der faziell abgegrenzte Muschelkalk weist hier mit etwa 100 bis 220 m gegenüber den angrenzenden Becken- bzw. Plattformbereichen (siehe unten) nur noch leicht erhöhte Mächtigkeiten auf. Nur in den beiden regional begrenzten Depozentren der Mittleren und Südlichen Mittelpolnischen Senke sensu SZULC & HAGDORN (Kap. 10.5) sind mit maximal etwa 290 bis 300 m etwas höhere Mächtigkeiten zu beobachten (Abb. 7).

Die Niederschlesien-Senke bildet in den polnischen Triasgebieten das zweite Depozentrum. In dessen Subsidenzachse, die von der Ostkarpaten-Pforte kommend, südlich an Posen (Poznan) und Landsberg an der Warthe (Gorzow Wielkopolski) vorbei in WNW–ESE in Richtung Lausitz/Brandenburg verläuft, erreicht der Muschelkalk maximale Mächtigkeiten von etwas über 250 m.

Im Bereich des NW–SE gerichteten Stettin-Wollstein-Hochs (Woiwodschaft Großpolen) gehen die Mächtigkeiten des Muschelkalks auf unter 150 m zurück.

Der nordöstlich der Mittelpolnischen Senke verlaufende Westrand der Osteuropäischen Plattform zeigt während der Ablagerung von Röt bis Unterkeuper (DADLEZ et al. 1998: Pl. 20) eine deutlich geringere Subsidenz. Die Mächtigkeiten liegen hier bei etwa 80 m für den Röt, 95 m für den Muschelkalk sowie 50 m für den Unterkeuper.

Südlich des Heiligkreuz-Gebirges besitzt das Mitteleuropäische Becken über die Ostkarpaten-Pforte in südöstlicher Richtung eine Anbindung an die Ostkarpaten-Dobrudscha-Senke und damit an die Tethys. Diese Meeresverbindung folgt in Verlängerung der Mittelpolnischen Senke ebenfalls der bereits alt angelegten, synsedimentär mehrfach reaktivierten Tesseyere-Tornquist-Linie. Die etwas weiter westlich gelegene, später geöffnete Meeresverbindung zur Tethys,

die Schlesisch-Mährische Pforte, folgt ebenfalls einem altangelegten tektonischen Lineament, und zwar einer SW–NE gerichteten Blattverschiebung zwischen dem Böhmischem und dem Präkarpaten-Massiv (GLAZEK & KUTEK 1976, SZULC 1993). Kurz nach der maximalen Überflutung des Beckens im Unteren Muschelkalk kam es zu einer markanten Absenkung des Meeresspiegels. In Nordostpolen setzte bereits eine Verflachung des Beckens ein, verbunden mit einem deutlichen Wechsel in der Fazies des Unteren Muschelkalks. Zu Beginn des Mittleren Muschelkalks wurden dann die bereits im Oberen Buntsandstein bestehenden Verbindungswege zwischen Tethys und Mitteleuropäischem Becken unterbrochen. Im abgeschnürten Muschelkalkbecken kam es zu einer weiteren Verflachung des Muschelkalkmeeres und zur Ablagerung von Evaporiten. Jedoch hat die Unterbrechung der Ingressionswege die beiden Pforten möglicherweise nicht zur gleichen Zeit betroffen. Während die Ostkarpaten-Pforte vermutlich relativ schnell geschlossen wurde, konnten über die Schlesisch-Mährische Pforte immer wieder marine Floren und Faunen in den direkt angrenzenden südpolnischen Teil des Beckens vordringen. Dies wird durch das häufige Vorkommen von Kieselschwämmen, Korallen, tethyalen Brachiopoden und Echinodermen sowie in der Gorasde-Formation und im Diploporendolomit von Wirtelalgen belegt, die bis in das Gebiet des Schlesisch-Krakauer Hochlandes und der Vorsudetischen Monokline einwanderten (Kap. 1.4 und 10.5). Im Oberen Muschelkalk kam es mit der Öffnung der Alemannischen Pforte zu einer grundlegenden Umorientierung der paläogeographischen Situation – jetzt wurde die reaktivierte Alemannische Pforte Haupttransgressionsweg für die marinen Wässer aus der Tethys. Die beiden östlichen Pforten blieben zwar ebenfalls geöffnet, doch infolge andauernder tektonischer Bewegungen war das Polnische Becken im Osten flacher (BEUTLER & SZULC 1999).

3. Das Klima zur Zeit der Mitteltrias in Mitteleuropa

Unter dem Begriff Klima versteht man das langfristige, auf die jeweils vergangenen 30 Jahre gemittelte Wettergeschehen eines Gebietes. In der Paläogeographie können so kurze Zeitabschnitte nicht unterschieden werden. Deshalb können Rekonstruktionen aufgrund paläoklimatisch interpretierter Beobachtungen (Proxies) ebenso wie globale Modelle zum Paläoklima gewöhnlich nur im langfristigen Mittel innerhalb einer weltweit korrelierbaren Stufe oder für eine bestimmte Kontinent-Konfiguration und Land-See-Verteilung erstellt werden. Diese Mittelwerte repräsentieren dann mehrere hunderttausend bis Millionen Jahre, innerhalb derer es regional teilweise erhebliche kürzerfristige Schwankungen gegeben hat.

Die wichtigsten Klimakomponenten sind Niederschlag, Evaporation, Sonneneinstrahlung, Temperatur, Windstärke und Windrichtung. Allen diesen Komponenten gemeinsam ist, dass sie für vergangene Epochen nicht mehr messbar sind. Um Klimamodelle an konkreten Beobachtungen zu eichen, ist man deshalb auf Proxies angewiesen, Stellvertreter, mit deren Hilfe das Klima rekonstruiert werden kann. Diese sind in den Sedimenten archiviert, wobei es treffsichere Proxies und vagere Anzeichen für das in der Vergangenheit herrschende Klima gibt. Pflanzen sind an sich die besten Klimazeiger, denn sie sind ortsfest und ihre Ansprüche an das Klima sind im Allgemeinen gut bekannt. Auch aus aquatischen Ablagerungen können die Floren der umgebenden Landmassen mittels eingetragener Pollen und Sporen zur Rekonstruktion des Klimas beitragen. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass Sporomorphen durch Strömungen weit verbreitet sein können.

Aber je weiter man in der Erdgeschichte zurückgeht, desto ungenauer werden die Daten. Die Pflanzen des frühen Mesozoikums und ihre klimatischen Ansprüche können mit denjenigen der heutigen Arten allenfalls noch auf Gattung- oder Familienebene verglichen werden. Das heißt, die Folgerungen sind entsprechend weniger genau. In noch stärkerem Maße gilt dies für die Temperaturansprüche verschiedener Tierarten und ganzer Lebensgemeinschaften (z.B. Riffe). In Frage kommen auch Sediment- (lakustrine Sedimente, Äolianite, Evaporite) und Bodentypen (Histosole, Krustenkarbonate, Salzböden, Ferrisole) und mineralogische Beobachtungen an der Zusammensetzung des Sedimentmaterials selbst, soweit es die Verwitterungsbedingungen der jeweiligen Liefergebiete abbildet. Marine Ablagerungen eignen sich zur Rekonstruktion des Klimas weniger gut als lakustrische Sedimente, da hier das energetische Environment eine größere Rolle für die Fazies der Sedimente spielt als das Klima. Von allen oben erwähnten Faktoren lässt sich das Feuchtigkeitsregime am besten rekonstruieren, da Niederschläge oder ihr Fehlen den stärksten Einfluss auf die Umwelt ausüben.

Dazu kommen noch Faktoren, die sich nur aus einem größeren Kontext erschließen lassen. Dazu gehören: paläogeographische Situation und Verteilung der Kontinentalmassen, orographische Position, Paläobreitenlage und daraus erschlossene vorherrschende Windsysteme (z.B. Monsun-Passat-System). Dies gelingt mit Hilfe von Modellen. Aus den paläogeographischen Daten werden Meeresströmungen und deren Temperatur im Jahresverlauf sowie die Windsysteme errechnet und daraus wiederum Niederschläge und Temperaturen (HAY et al. 1994, GOLONKA et al. 1994). Aber viele Faktoren sind nur vage oder gar nicht bekannt. So gibt es keine Daten zur orographischen Höhe des

Vindelizischen Massivs, das eine Barriere zwischen der regenbringenden Tethys und dem Germanischen Becken bildete. Die größten Probleme bereitet aber die riesige Landmasse Pangäa, für die es kein direktes rezentes Analogon gibt, das man für Vergleiche heranziehen könnte. Digitale Modelle erlauben es jedoch, den Einfluss unterschiedlicher Annahmen über diese Faktoren in variierten Rechenläufen zu ermitteln und mit den Klimadaten, die aus den Proxies abgeleitet wurden, zu vergleichen.

Das Germanische Becken bildete zur Zeit des Muschelkalks ein Randbecken an der Nordwestküste der Neotethys (Abb. 8, 9), das sich von ca. 20° bis 35° nördlicher Breite erstreckte und damit noch im Bereich des großen Monsunsystems lag, das sich über Pangäa seit dem Rotliegend aufgebaut hatte (VAN DER ZWAN & SPAAK 1992, PARRISH 1993, MUTTI & WEISSERT 1996). Im Nordsommer erhitze sich die Luft über dem Inneren des großen Kontinents, stieg auf und bildete ein Tiefdrucksystem aus. Die abströmende Luft wurde von äquatorialen Luftmassen ersetzt, die mit Feuchtigkeit beladen nach Norden strömten und hier den Regen spendenden Monsun brachten. Im Nordwinter drehten sich die Verhältnisse um. Über den abgekühlten Luftmassen im Innern Pangäas bildete sich ein stabiles Hochdruckgebiet. Die Luft strömte am Erdboden als trockener Nordost-Passat zurück zum äquatorialen Bereich (Abb. 8).

Bei der Rekonstruktion der Windsysteme ist allerdings die gegenüber der heutigen Situation um etwa 40° gegen den Uhrzeigersinn rotierte Lage Mitteleuropas während der Mittleren Trias zu berücksichtigen (GOLONKA et al. 1994, GOLONKA & FORD 2000). Dem entsprechend lag das Nordseegebiet ebenso wie der heutige Süddeutsche Raum in einer vergleichbaren Breitenlage wie heute der Persische Golf. Der heutige Ostrand des Beckens verlief in eine Breite, die dem heutigen Nordirak bzw. Syrien entspricht. Die Windrichtung des triassischen NE–SW-Passats muss daher auf Karten mit heutiger geographischer Orientierung annähernd von Ost nach West eingetragen werden (Abb. 8). Klimamodelle zeigen jedoch für die gesamte Trias ein stabiles Hochdruckgebiet über dem ozeanischen Golf der Tethys, das seine Breitenlage zwischen einer äquatornahen Position im Winter und etwa 20° N im Sommer wechselte (GOLONKA et al. 1994). Dies führte zu wechselnden Windsystemen im Westen der Tethys, zu denen auch auf den Kontinent gerichtete Luftströmungen Feuchtigkeit in das Muschelkalk-Becken hineinragen konnten. Entsprechend lagen die Beckenteile unmittelbar westlich und nördlich von Hochgebieten ganzjährig im Regenschatten dieser Höhenzüge – also etwa die Nordost-Küste des Vindelizischen Landes oder die Riftsenken des Nordatlantikraumes.

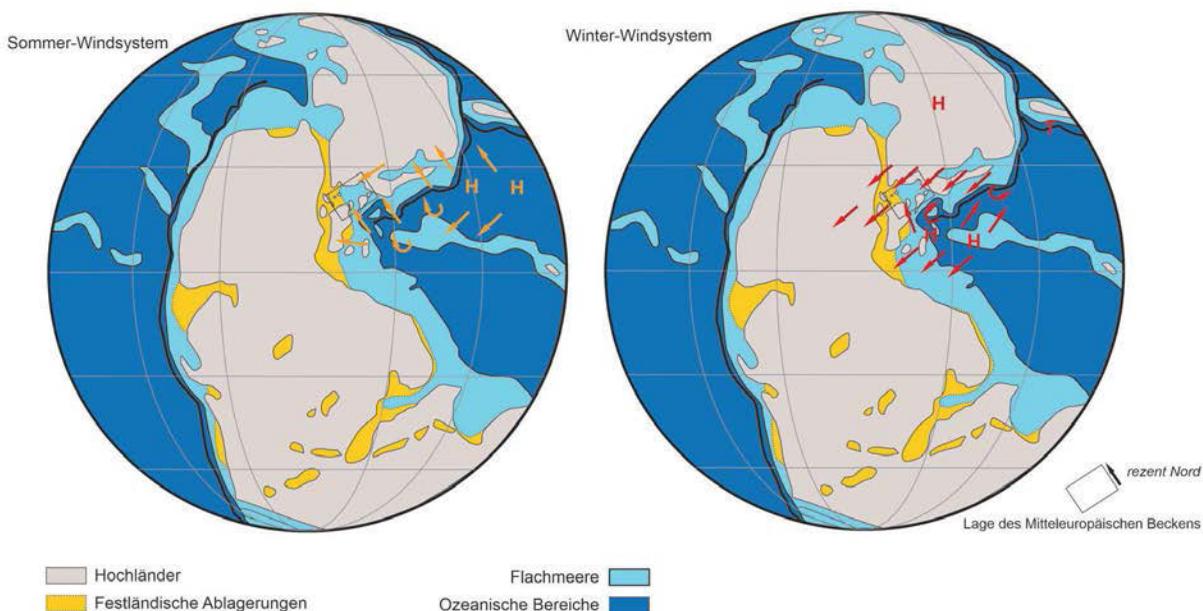


Abb. 8: Schematische Weltkarte von Pangaea mit den Haupt-Windrichtungen während Südsommer (links) und Nordsommer (rechts). Die Pfeile zeigen in die kontinentalen Hitzetiefs, die aus Tethys bzw. Panthalassa wasserreiche Luftmassen ansaugen und sommerliche Monsunregen bringen (verändert nach PARRISH 1999, GOLONKA ET AL. 1994, GOLONKA & FORD 2000).

Dagegen konnten die heutigen Süd- und Ostflanken der Hochgebiete im Sommer von ansteigenden Monsunwinden getroffen werden, die zuvor die westliche Tethys und teilweise das Muschelkalkmeer überquert hatten und über dem Ardennisch-Gallischen und dem Skandinavischen Hochland abregnen konnten. Die weitere Verbreitung der alluvialen und deltaischen Randfazies im Westen und Norden des Muschelkalkbeckens (Kap. 6.2) kann daher als Folge dieser Windsysteme betrachtet werden.

Trotz der oben skizzierten Einschränkungen können für den Unteren und Oberen Muschelkalk einige grundsätzliche Aspekte herausgearbeitet werden. Beides waren flache Nebenmeere, die ein reiches Benthos aufwiesen. Das heißt, dass das Meer von oben bis auf den Grund durchlüftet war. Es bildete sich keine stabile Schichtung durch Zuflüsse von Süßwässern aus, wie sie für humide, euxinische Nebenmeere (Ostsee, Schwarzes Meer) typisch ist. In der Beckenrandfazies, zum Beispiel in der Eschenbach- und Grafenwöhr-Formation, sind feldspatreiche Sandsteine häufig, die auf aride Verwitterung hinweisen (SCHWARZ 1975, HAGDORN et al. 2019; Kap. 8.5 und 8.6). Sabkhas, die den Rand des Muschelkalkmeeres begleiteten, enthalten Karbonat- oder Gipskonkretionen, dünne Lagen dieser Minerale oder frühdiagenetische Karbonatzemente. Diese Hinweise lassen ebenfalls auf ein arides Klima schließen.

Im Mittleren Muschelkalk war der Meeresspiegel im Vergleich zum Unteren und Oberen Muschelkalk am niedrigsten. Die Verbindungen zwischen den einzelnen Meeresbereichen waren eingeschränkt und damit

der Austausch mit ozeanischen Wässern verringert. Das heißt, dass das Klima während dieser Zeit nicht zwangsläufig arider gewesen sein muss als während der Ablagerung von Unteren und Oberem Muschelkalk. Die Bänke und Horizonte mit eingeschränkt marinen Wirbellosen- und Wirbeltierfaunen im Mittleren Muschelkalk des Polnischen und Norddeutschen Beckens, besonders in dessen oberem Abschnitt (RAAB 1907, PICARD 1915, SCHULTZE & MÖLLER 1986) sind eher durch kurzfristig verbesserten Wasseraustausch mit der Tethys und Fauneneinwanderung als durch geringere Aridität (geringere Verdunstung) induziert. Das gilt auch für die z.T. artenreichen Faunen und Dasycladaceen-Vorkommen in der oberen Diemel-Formation des Süddeutschen Beckens (BENECKE 1898, HOHENSTEIN 1913). Auch Acritarchen, die sonst im Plankton des Mittleren Muschelkalks fehlen und die in normal marinen Wässern vorkommen, stellten sich im oberen Bereich des Mittleren Muschelkalkes wieder ein (BRÜCKNER-RÖHLING & HEUNISCH 2004).

Der Muschelkalk wurde in letzter Zeit mehrfach zylo- und sequenzstratigraphisch untersucht (AIGNER 1985, AIGNER & BACHMANN 1992, KĘDZIERSKI 2002, BACHMANN & KOZUR 2004, GÖTZ 2004, LIPPMANN et al. 2005, GÖTZ & GAST 2010, MATYSIK 2010, 2019, FRANZ et al. 2015). Die Ergebnisse der einzelnen Bearbeiter unterscheiden sich allerdings beträchtlich (Kap. 6.1). Es ist nicht belegt, ob die festgestellten oder auch nur angenommenen Zyklen Milankovitch-Zyklen, also klimatisch induziert sind (vgl. auch Kap. 1.3).

Aus dem Mittleren Muschelkalk Südwestdeutschlands sind aus den beckenrandlichen Gebieten Rotsedimen-

te bekannt. Sie entstanden in ausgedehnten Lagunen, welche nur gelegentlich von marinen Wässern überflutet wurden (Ralingen-Formation, Kap. 8.3, 9.11, 9.12). Rote Mergel waren bereits von LOTZE (1933) im Weserbergland beschrieben worden, von SIMON (2004) auch im Steinsalz der Heilbronn-Formation Baden-Württembergs. Vom nördlichen Beckenrand aus bauten sich pedogene Rotsedimente bis in den Raum Rügen und Vorpommern vor (Kap. 7.1; z. B. KOZUR 1974, BEUTLER 2004, FRANZ et al. im Druck). Rotsedimente sind aber noch kein Indikator für arides Klima, sondern zeigen nur an, dass die Menge an oxidierbaren Substanzen geringer war als die Menge des vorhandenen und nachlieferbaren Sauerstoffs, so dass daraus oxidierte Sedimente resultierten (FRANKE & PAUL 1980). Sie sind eher ein Anzeichen für oligotrophe Milieus.

BRÜCKNER-RÖHLING & HEUNISCH (2004) untersuchten an Hand der nördlich des Harzes abgeteufte Bohrung Remlingen 7 die Palynofazies des Mittleren Muschelkalks. Sie stellten fest, dass die Palynomorphen überwiegend von eingewehten Landpflanzen stammen, während Acritarchen nahezu vollständig fehlen, und schlossen daraus, dass der Mittlere Muschelkalk in einem hochsalinaren, lebensfeindlichen Nebenmeer abgelagert wurde. Erst im obersten Abschnitt machte sich ein mariner Einfluss durch randlich-marine Leiosphären und Grünalgen bemerkbar.

Das oben skizzierte Monsun-Modell, das auf das Klima des Buntsandsteins und des Keupers allgemein angewandt wird, wurde für den Fall des Oberen Muschelkalks von FRANZ et al. (2015) in Frage gestellt. An Hand der unterschiedlichen Küstentypen des Muschelkalkmeers, das im Süden und Westen von Sabkhas, im Nordosten und Osten aber von einer deltaischen Küstenebene mit erheblichen Süßwasserzuflüssen begrenzt wurde, schlossen die Autoren auf eine stabile Anordnung von Klimagürteln, die mit dem heutigen zonalen Klima der nördlichen Hemisphäre vergleich-

bar wäre. Entsprechend hätte der südliche und westliche Teil des Muschelkalkmeers im Einflussbereich eines arid-semiariden Klimagürtels gelegen und der nordöstliche und östliche Teil im Einflussbereich eines gemäßigten bis subhumiden Klimagürtels (Abb. 9). Weiter rekonstruierten FRANZ et al. (2015) für den Oberen Muschelkalk ein Muster hierarchisch gegliederter Meeresspiegelschwankungen dritter bis fünfter Ordnung, welches die durch AIGNER (1985) beschriebenen Kleinzyklen des Oberen Muschelkalks integriert. Mit Bezug auf FISCHER (1964) und GOLDHAMMER et al. (1987) diskutieren sie eisbedeckte Polkappen als Ursache hochfrequenter Meeresspiegelschwankungen, die in der Lage gewesen wären größere Wassermassen kurzfristig zu binden bzw. freizugeben. Allerdings liegen aus den Polargebieten der Trias bislang keine Belege für solche Eiskappen vor. Es ist bislang nicht gesichert, ob auf das Klima während der Ablagerung des Muschelkalks eher das „Monsun-Modell“ oder das „zonare Modell“ angewendet werden kann. Messungen von Strömungsrichtungen im Muschelkalk, die die vorherrschenden Windrichtungen widerspiegeln, fehlen für den zentralen Teil des Beckens. Für den Südteil hat AIGNER (1985) einen markanten Transport aus SW festgestellt:

Nach Untersuchungen von KORTE et. al. (1998, 2005) und FRANZ et al. (2015) an Schalen von Brachiopoden, Conodonten und Fischzähnen aus dem Muschelkalk sind die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte gegenüber gleichalten Proben aus der Tethys um etwa 1–4 ‰ verschoben, insbesondere im Oberen Muschelkalk (Kap. 7.1). Die Autoren folgern daraus, dass das Meer zur Zeit des Oberen Muschelkalks im Vergleich zur Tethys verbrackert war, was vor allem auf den starken Süßwassereintrag von nördlichen Liefergebieten zurückgeführt wird. Ähnliche Schlüsse wurden von HAGDORN & SIMON (1993) aus dem Fehlen stenohaliner Echinodermen und Korallen über der Holocrinusbank gezogen.

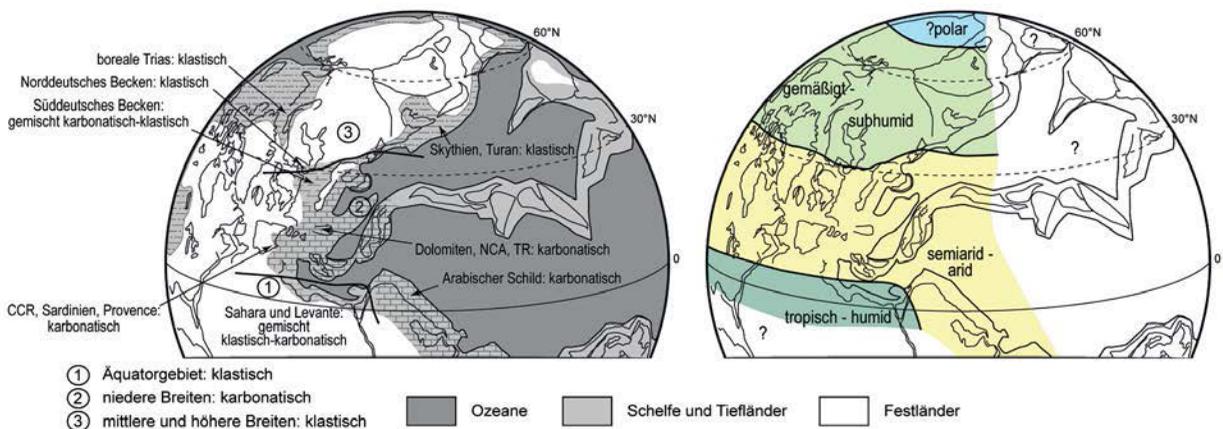


Abb. 9: Paläogeographie für das Ladinium (verändert nach STAMPFLI & BOREL 2002); links: Ablagerungsräume Nord-Pangäas, rechts: abgeleitete zonale Klimagürtel; verändert aus FRANZ et al. (2015). CCR: katalanisches Küstengebirge, NCA: Nördliche Kalkalpen, TR: Transdanubien.

Insgesamt herrschte in Mitteleuropa während der Ablagerungszeit des Muschelkalks ein warmes, mäßig arides Klima. Die Norddrift des Kontinents hielt während der gesamten Zeit an (GLENNIE 1990). Aber infolge der relativ kurzen Dauer der Muschelkalkablagerung von nur wenigen Millionen Jahren blieb Mitteleuropa im Wesentlichen in der Zone der Passatwinde, wenn auch im Oberen Muschelkalk die Einflüsse eines nördlichen feuchten Klimas möglicherweise stärker wurden. Anzeichen für Tropenstürme (Hurrikane, Taifune) sind in den v.a. in der Tonplattenfazies der Meißner-Formation des Oberen Muschelkalk häufigen Tempestiten erhalten (AIGNER 1985), außerdem in den Echinodermen-Konservatlagerstätten, die auf rasche Verschüttung benthischer Lebensgemeinschaften zurückzuführen sind (HAGDORN im Druck).

Zusammenfassend kann die Klimaentwicklung im Bereich des Mitteleuropäischen Beckens im Anisium als arid mit Tendenz zu semiarid-monsunal im Ladinium bezeichnet werden. Die dem Buntsandstein ähnliche nichtmarine Randfazies des Unteren Muschelkalks und dessen von Karbonaten dominierte Sedimentation im größten Teil des Beckens sprechen für eher geringen und wohl episodischen Abfluss aus den umgebenden Festländern. Die Evaporite in peritidalen Ablagerungsräumen und erst recht jene des Mittleren Muschelkalks sprechen für hohe Verdunstungsraten. Dagegen erhalten klastische Sedimenteinträge im Oberen Muschelkalk bereits vom Beginn der Transgression im späten Anisium an eine prominente, bis in das Ladinium zunehmende Bedeutung und weisen auf vermehrte Niederschläge insbesondere im Skandinavischen Hochland, die schließlich zur Verlandung des Meeresgebiets im Keuper führten.

Dank

Wir danken Gerhard H. Bachmann, Halle/Saale, und Theo Simon, Fichtenberg, für sorgfältige Durchsicht des Manuskripts und konstruktive Kritik. Für die Bearbeitung verschiedener Abbildungen danken wir Christoph Wisnicki.

Schriftenverzeichnis

- AIGNER, T. (1985): Storm Depositional Systems. – Lecture Notes in Earth Sciences, 3: 1-174; Heidelberg (Springer).
- AIGNER, T. & BACHMANN, G.H. (1992): Sequence-stratigraphic framework of the German Triassic. – *Sedimentary Geology*, 80: 115-135; Amsterdam (Springer).
- ALTHEN, G.W., RUSBÜLT, J. & SEEGER, J. (1980): Ergebnisse einer regionalen Neubearbeitung des Muschelkalks der DDR. – *Zeitschrift für geologische Wissenschaften*, 8: 985-999; Berlin.
- BACHMANN, G.H. & KOZUR, H.W. (2004): The Germanic Triassic: Correlation with the international chronostratigraphic scale, numerical ages, Milankovitch cyclicity. – *Halle-sches Jahrbuch für Geowissenschaften*, B 26: 17-62; Halle (Saale).
- BACHMANN, G.H., GELUK, M., WARRINGTON, G., BECKER-ROMAN, A., BEUTLER, G., HAGDORN, H., HOUNSLOW, M., NITSCH, E., RÖHLING, H.-G., SIMON, T. & SZULC, J. (2010): Triassic. – In: Doornenbal, J.C. & Stevenson, A.G. (eds.): *Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area*: 175-193; Houten (EAGE).
- BACHMANN, G.H. & GROSSE, S. (1989): Struktur und Entstehung des Norddeutschen Beckens. Geologische und geophysikalische Interpretation einer verbesserten Bouguer-Schwerkarte. – *Niedersächsische Akademie für Geowissenschaften, Veröffentlichungen*, 2: 23-47; Hannover.
- BACHMANN, G.H. & HOFFMANN, N. (1997): Paläotektonik. Bildung und Entwicklung des Norddeutschen Beckens. – In: PLEIN, E. (Hrsg.): *Stratigraphie von Deutschland I – Norddeutsches Rotliegendebcken*. – *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, 183: 159-169; Frankfurt a. M.
- BALDSCHUHN, R., BINOT, F., FLEIG, S. & KOCKEL, F. (Hrsg.) unter Mitarbeit von BALDSCHUHN, R. BEST, G., BINOT, F., BRÜCKNER-RÖHLING, S., DENEKE, E., FRISCH, U., HOFFMANN, N., JÜRGENS, U., KOCKEL, F., KRULL, P., RÖHLING, H.-G., SCHMITZ, J., SÄTTLER-KOSINOWSKI, S., STANCU-KRISTOFF, G. & ZIRNGAST, M. (2001): *Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie*. – *Geologisches Jahrbuch*, A 153: 1-88, 3 CD-ROMs; Hannover.
- BARNASCH, J. (2010): Der Keuper im Westteil des Zentraleuropäischen Beckens (Deutschland, Niederlande, England, Dänemark): diskontinuierliche Sedimentation, Litho-, Zylo- und Sequenzstratigraphie. – *Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 71: 1-170; Hannover.
- BARTH, G., FRANZ, M., HEUNISCH, C., ERNST, W., ZIMMERMANN, J. & WOLFGGRAMM, M. (2018): Marine and terrestrial sedimentation across the T-J transition in the Central European Basin. – *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 489: 74–94; Amsterdam.
- BECKER, A. (2005): Sequenzstratigraphie und Fazies des Unteren und Mittleren Buntsandsteins im östlichen Teil des Germanischen Beckens (Deutschland, Polen). – *Halle-sches Jahrbuch Geowissenschaften*, B, Beihefte 21: 1-117; Halle/Saale.
- BEER, H. & RUSBÜLT, J. (2010): Muschelkalk - Mächtigkeit und Fazies. – In: STACKEBRANDT, W. & MANHENKE, V. (Hrsg.): *Atlas zur Geologie von Brandenburg*. – 4. Aufl., 76-77; Kleinmachnow (Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg).
- BENECKE, E. W. (1898): Diplopore und einige andere Versteinerungen im elsass-lothringischen Muschelkalk. – *Mitteilungen der geologischen Landesanstalt von Elsass-Lothringen*, 4: 277-285; Straßburg.
- BERTELSEN, F. (1978): The Upper Triassic–Lower Jurassic Vinding and Gassum Formations of the Norwegian-Danish Basin. – *Danmarks Geologiske Undersøgelse*, B 3: 24 S.
- BERTELSEN, F., BLESS, M.J.M., GAJEWSKA, I., GLUSKO, W.W., KISNERJUS, J.L., KOCKEL, F., LARSSON, K., LUPU, M., MONKEVIC, E.N., NJAGA, V.J., POLUCHTOVIC, B.M., SCHÜLER, F.,

- SUVEJZDIS, P.J., SZYPERKO-TELLER, A., VISNIAKOV, I.B. & WATSON, W. (1986): Lithologic-paleogeographical map Middle Bunter (Triassic), inset map 1 : 10 000 000 (First version). – IGCP-Projekt No. 86: Southwest border of the East European Platform, edited by the National Committee of the German Democratic Republic.
- BEST, G. (1988): Die Grenze Zechstein/Buntsandstein in Nordwestdeutschland und in der südlichen deutschen Nordsee nach Bohrlochmessungen (Gamma Ray und Sonic Log). – Geologisches Jahrbuch Hessen, 116: 1922; Wiesbaden.
- BEST, G. (1989): Die Grenze Zechstein/Buntsandstein im Nordwestdeutschland nach Bohrlochmessungen. – Zeitschrift der deutschen Geologischen Gesellschaft, 140: 73-85; Hannover.
- BEUTLER, G. (1993): Der Muschelkalk zwischen Rügen und Grabfeld. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.), Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991 (= Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, 2): 47-56; Stuttgart, Korb (Goldschnecke).
- BEUTLER, G. (1995): Quantifizierung der altkimmerischen Bewegungen in Nordwestdeutschland. – BGR Forschungsbericht.
- BEUTLER, G. (2004): Trias. – In: KATZUNG, G. (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern, 140-150; Stuttgart (Schweizerbart).
- BEUTLER, G. & SCHÜLER, F. (1987): Probleme und Ergebnisse der lithostratigraphischen Korrelation der Trias am Nordrand der Mitteleuropäischen Senke. – Zeitschrift für geologische Wissenschaften, 15: 421-436; Berlin.
- BEUTLER, G. & SZULC, J. (1999): Die paläogeographische Entwicklung des Germanischen Beckens in der Trias und die Verbindung zur Tethys. – In: HAUSCHKE, N. & WILDE, V. (Hrsg.), Trias, eine ganz andere Welt: Mitteleuropa im frühen Erdmittelalter: 71-80; München (Pfeil).
- BOIGK, H. & SCHÖNEICH, H. (1970): Die Tiefenlage der Permabasis im nördlichen Teil des Oberrheingrabens. – In: ILLIES, J. H. & MÜLLER, S. (Hrsg.): Graben Problems: 45-55; Stuttgart (Schweizerbart).
- BOIGK, H. & SCHÖNEICH, H. (1974): Perm, Trias und älterer Jura im Bereich der südlichen Mittelmeer-Mjösen-Zone und des Rheingrabens. – In: ILLIES, J.H. & FUCHS, K. (Hrsg.): Approaches to Taphrogenesis: 60-71; Stuttgart (Schweizerbart).
- BORKHATARIA, R. (2004): Integrated exploration- and production-scale reservoir prediction in “grainy” and “muddy” epeiric carbonate ramp deposits: The Muschelkalk (Triassic), The Netherlands. – Diss. Universität Tübingen, XII, 163 S. [unveröffentlicht].
- BRANDER, T. & LIPPOLT, H. J. (1998): Das Alter der Roteisenerze in der Verkieselungszone bei Rammelsbach (Münsterthal, Südschwarzwald) nach (U/Th)⁴He-Untersuchungen. – Jahreshefte des Geologischen Landesamts Baden-Württemberg, 38: 7-42; Freiburg i.Br.
- BRENNAND, T.P. (1975): The Triassic of the North Sea. – In: WOODLAND, A.W. (ed.): Petroleum and the continental shelf of NW Europe, Vol. I, Geology: 295-311; London (Applied Science Publishers).
- BRÜCKNER-RÖHLING, S. (2002): Sequenzstratigraphie des Mittleren Muschelkalks in Norddeutschland und der deutschen Nordsee. – Diss. Universität Halle, 200 S. [unveröffentlicht].
- BRÜCKNER-RÖHLING, S. & HEUNISCH, C. (2004): Zyklustratigraphie und Palynofazies des Mittleren Muschelkalks der Bohrung Remlingen 7 (Norddeutsches Becken). – Halle-sches Jahrbuch für Geowissenschaften, B, Beihefte 18: 109-120; Halle (Saale).
- CAMERON, T. D.J., CROSBY, A., BALSON, P.S., JEFFERY, D.H., LOTT, G.K., BULAT, J. & HARRISON, D.H. (1992): United Kingdom Offshore Regional Reports: The Geology of the southern North Sea. – 152 pp.; London (HMSO for British Geological Survey).
- DADLEZ, R. (2003): Mesozoic thickness pattern in the Mid-Polish Trough. – Geological Quarterly, 47 (3): 223-240; Warszawa.
- DADLEZ, R., NARKIEWICZ, M., STEPHENSON, R.A., VISSER, M.T.M. & VAN WEES, J.-D. (1995): Tectonic evolution of the Mid-Polish Trough: modelling implications and significance for central European geology. – Tectonophysics, 252: 179-195.
- DADLEZ, R., MAREK, S. & POKORSKI, J. (1998): Paleogeographical Atlas of the epicontinental Permian and Mesozoic in Poland. – 7 pp., 75 pls.; Warszawa (Pánstwowy Instytut Geologiczny).
- DAY, G.A., COOPER, B.A., ANDERSON, C., BURGERS, W.F.J., RONNEVIK, H.C. & SCHÖNEICH, H. (1981): Regional seismic structure maps of the North Sea. – In: ILLING, L.V. & HOBSON, G.D. (eds.): Petroleum Geology of the Continental Shelf of Northwest Europe: 76-84; London (Heyden & Sons).
- DE JAGER, J. (2007): Geological development. – In: WONG, T., BATES, D.A.J. & DE JAGER, J. (eds.): Geology of the Netherlands, 5-26; Amsterdam (Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences).
- DITTRICH, D. (1989): Beckenanalyse der Oberen Trias der Trier-Luxemburger Bucht. Revision der stratigraphischen Gliederung und Rekonstruktion der Paläogeographie. – Veröffentlichungen des Luxemburger geologischen Dienstes, 26: 1-223; Luxembourg.
- DITTRICH, D. (2005): Keuper. – In: Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (Hrsg.): Geologie von Rheinland-Pfalz: 175-186; Stuttgart (Schweizerbart).
- DITTRICH, D. (im Druck): Die gallo-ardennische Randfazies der Trias in der Südeifel und in Luxemburg. – In: HAUSCHKE, N. & BACHMANN, G. H. & FRANZ, M. (Hrsg.): Trias. Aufbruch ins Erdmittelalter; München (Pfeil).
- DOORNENBAL, J.C. & STEVENSON, A.G. (Eds.) (2010): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area. – 342 S.; EAGE Publications b.v. (Houten).
- FEIST-BURKHARDT, S., GÖTZ, A.E., RUCKWIED, K. & RUSSELL, J.-W. (2008): Palynofacies patterns, acritarch diversity and stable isotope signatures in the Lower Muschelkalk (Middle Triassic) of N Switzerland: evidence of third-order cyclicity. – Swiss Journal of Geosciences, 101: 1-15; Basel.
- FISCHER, A.G. (1964): The Lofar Cyclothem of the Alpine Triassic. – Kansas Geological Survey Bulletin, 169: 107-149; Lawrence.
- FRANK, M. (1931): Marine Straßen und Faunenwanderwege in Süddeutschland zur Triaszeit. – Geologische Rundschau, 22 (1): 1-11; Berlin.
- FRANKE, W. & PAUL, J. (1980): Pelagic redbeds in the Devonian of Germany – deposition and diagenesis. – Sedimentary Geology, 25: 231-256, Amsterdam.

- FRANZ, M., KAISER, S.I., HEUNISCH, C., KUSTATSCHER, E., LUPPOLD, F.W., BERNER, U. & RÖHLING, H.-G. (2015): Eustatic and climatic control on the Upper Muschelkalk Sea (late Anisian/Ladinian) in the Central European Basin. – *Global and Planetary Change*, 135: 1-27; Amsterdam.
- FRANZ, M., VOIGT, T. & MÜLLER, A. (im Druck): Der Muschelkalk im zentralen Germanischen Becken. – In: HAUSCHKE, N., BACHMANN, G.H. & FRANZ, M. (Hrsg.): *Trias – Aufbruch in das Erdmittelalter*. München (Pfeil).
- FREUDENBERGER, W. (1996): Trias. – In: *Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 500.000* [4. Aufl.]: 65–89; München (Bayerisches Geologisches Landesamt).
- GAERTNER, H. (1993): Zur Gliederung des Muschelkalks in Nordwestdeutschland in Tiefbohrungen anhand von Bohrlochmessungen. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.), *Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991* (= Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, 2): 57-64; Stuttgart, Korb (Goldschneck).
- GAERTNER, H. & RÖHLING, H.-G. (1993): Zur lithostratigraphischen Gliederung und Paläogeographie des Mittleren Muschelkalks im Nordwestdeutschen Becken. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.), *Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991* (= Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, 2): 85-103; Stuttgart, Korb (Goldschneck).
- GAJEWSKA, I. (1997): Middle-Triassic: Muschelkalk–Lower Keuper. Sedimentation, palaeogeography and paleotectonics. – In: MAREK, S. & PACHLOWA, M. (eds.): *The epicontinental Permian and Mesozoic in Poland*. – *Prace Panstwowege Instytutu Geologicznego*, 153: 144-150; Warszawa.
- GELUK, M. C. (2005): Stratigraphy and tectonics of Permo-Triassic basins in the Netherlands and surrounding areas. – 171 S.; Utrecht [Selbstverlag].
- GELUK, M.C., PLOMP, A. & VAN DOORN, T.H.M. (1996): Development of the Permo-Triassic succession in the basin fringe area, southern Netherlands. – In: RONDEEL, H.E., BATJES, D.A.J. & NIEUWENHUIJS, W.H.: *Geology of gas and oil under the Netherlands*: 57-78; Dordrecht (Kluwer Academic Press).
- GELUK, M.C., BRÜCKNER-RÖHLING, S. & RÖHLING, H.-G. (2000): Salt occurrences in the Netherlands and Germany: New insights in the formation of salt basins. – In: GEERTSMAN, R. C. (ed.): *Proceedings of the 8th World Salt Symposium*, 131-136. Amsterdam (Elsevier).
- GELUK, M.C. & RÖHLING, H.-G. (1997): High-Resolution Sequence Stratigraphy of the Lower Triassic ‘Buntsandstein’ in the Netherlands and northwestern Germany. – *Geologie en Mijnbouw*, 76: 227-246; Amsterdam.
- GELUK, M.C. & RÖHLING, H.-G. (1999): High-resolution sequence stratigraphy of the Lower Triassic Buntsandstein: A new tool for basin analysis. – *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I* 1998 (7-8): 727-745; Stuttgart.
- GELUK, M.C. & RÖHLING, H.-G. (2013): Der Buntsandstein in den Niederlanden und Nordost-Belgien. – In: *Deutsche Stratigraphische Kommission* (Hrsg.; Koordination und Redaktion J. LEPPER und H.-G. RÖHLING für die Subkommission Perm-Trias): *Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein – Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 69: 583-597; Hannover.
- GeORG-Projektteam (2013): Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben, Fachlich-Technischer Abschlussbericht des Interreg-Projekts GeORG, Teile 1–4. – 691 S., 98 Kt.; Internet (<http://www.geopotenziale.eu>).
- GLĄZEK, J. & KUTEK, J. (1976): Post-Variscan geotectonic development of the Holy Cross Mts. area. – *Guidebook of the 48th Meeting of the Polish Geological Society*, 14-51; Warszawa [in Polish].
- GLENNIE, K. W. (1990): *Introduction to the Petroleum Geology of the North Sea*. – 416 p., (3rd rev. ed.); London (Wiley-Blackwell).
- GOLONKA, J. & FORD, D. (2000): Pangean (Late Carboniferous – Middle Jurassic) paleoenvironment and lithofacies. – *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 161: 1-34; Amsterdam.
- GOLONKA, J., ROSS, M.J. & SCOTESE, C.R. (1994): Phanerozoic paleogeographic and paleoclimatic modeling maps. – *Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir*, 17: 1-47; Calgary.
- GÖTZ, A.E. (2004): Zyklen und Sequenzen im Unteren Muschelkalk des germanischen Beckens. – *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, B, Beihefte* 18: 91-98; Halle (Saale).
- GÖTZ, A.E. & FEIST-BURKHARDT, S. (1999): Sequenzstratigraphische Interpretation der Klein-Zyklen im Unteren Muschelkalk (Mitteltrias, Germanisches Becken). – *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I*; 1997: 1205-1219; Stuttgart.
- GÖTZ, A.E. & GAST, S. (2010): Basin evolution of the Anisian Peri-Tethys: implications from conodont assemblages of Lower Muschelkalk key sections (Central Europe). – *Zeitschrift der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 161 (1): 39-49; Stuttgart.
- HAGDORN, H. (im Druck): Seelilien und andere Echinodermen der Germanischen Trias. – In: HAUSCHKE, N., BACHMANN, G. H. & FRANZ, M. (Hrsg.): *Aufbruch ins Erdmittelalter*; München (Pfeil).
- HAGDORN, H., MENNING, M., NITSCH, E. & SIMON, T. (2019): Die Muschelkalk-Gruppe in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016 (STD 2016). – *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (German Journal of Geology)*, DOI:10.1129/zdgg/2019/0197.
- HAGDORN, H. & SIMON, T. (1993): Ökostratigraphische Leitbänke im Oberen Muschelkalk. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.), *Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991* (= Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, 2): 193-208; Stuttgart, Korb (Goldschneck).
- HAY, W. W., THOMPSON, S. I., POLLARD, D., WILSON, K. M. & WOLD, C. N. (1994): Results of a climatic model for Triassic Pangaea. – *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I* 1992: 1253-1265; Stuttgart.
- HEUNISCH, C. & RÖHLING, H.-G. (2016): Early Triassic phytoplankton episodes in the Lower and Middle Buntsandstein of the Central European Basin. – *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (German Journal of Geology)*, 167 (2/3): 227-248; Stuttgart.
- HIRSCH, F. (1972): Middle Triassic conodonts from Israel, Southern France and Spain. – *Mitteilungen der Gesellschaft der Geologie- und Bergbaustudenten*, 21: 811-827; Innsbruck.
- HOHENSTEIN, V. (1913): Beiträge zur Kenntnis des Mittleren Muschelkalks und des unteren Trochitenkalks am östlichen Schwarzwaldrand. – *Geologisch-paläontologische Abhandlungen, N.F.* 12: 173-272; Jena.

- HOWARD, A.S., WARRINGTON, G., AMBROSE, K. & REES, J.G. (2008): A formational framework for the Mercia Mudstone Group (Triassic) of England and Wales. – British Geological Survey Research Report, RR/08/04, iv+33pp. Keyworth, Nottingham (British Geological Survey).
- IWANOW, A. (1998): Plates 19, 22, 23, 24, 25, 26. – In: DADLEZ, R., MAREK, S. & POKORSKI, J. (1998): Palaeogeographical Atlas of the epicontinental Permian and Mesozoic in Poland, 7 S., 1 Tab., 75 Pl.; Warszawa (Panstwowy Instytut Geologiczny).
- JACKSON, D.I., JOHNSON, H. & SMITH, N.J.P. (1997): Stratigraphical relationship and a revised lithostratigraphical nomenclature of the Carboniferous, Permian and Triassic rocks of the offshore East Irish Sea Basin. – In: MEADOWS, N.S., TRUEBLOOD, S.P., HARDMAN, M. & COWAN, G. (eds.): Petroleum Geology of the Irish Sea and Adjacent Areas. – Geological Society Special Publication, 124: 11-32; London.
- JOHNSON, H., WARRINGTON, G. & STOKER, S.J. (1994): 6. Permian and Triassic of the Southern North Sea. – In: KNOX, R.W.O'B. & CORDEY, W.G. (eds): Lithostratigraphic nomenclature of the UK North Sea: 141+A1 pp.; Nottingham (British Geological Survey on behalf of the UK Offshore Operators Association).
- JÜRGENS, U. (1989a): Gaspotential Deutsche Nordsee. Erläuterungen zu Blatt C 702. – Bericht Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 103266: 68 S.; Hannover [unveröffentlicht].
- JÜRGENS, U. (1989b): Gaspotential Deutsche Nordsee. Erläuterungen zu Blatt C 11-06. – Bericht Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 104518: 70 S.; Hannover [unveröffentlicht].
- KĘDZIERSKI, J. (2002): Sequenzstratigraphie des Unteren Muschelkalks im östlichen Teil des Germanischen Beckens (Deutschland, Polen). – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, B., Beihefte 16: 52 S.; Halle (Saale).
- KOCKEL, F. with contributions by BALDSCHUHN, R., BEST, G., BINOT, F., FRISCH, U., GROSS, U., JÜRGENS, U., RÖHLING, H.-G. & SATTLER-KOSINOWSKI, S. (1995): Structural and Palaeogeographical Development of the German North Sea Sector. – Beiträge zur Regionalen Geologie der Erde, 26: 96 S.; Berlin, Stuttgart (Gebr. Borntraeger).
- KOCKEL, F. mit Beiträgen von S. BRÜCKNER-RÖHLING, H.-G. RÖHLING & U. FRISCH (1999): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:300 000. Teil 18: Die paläogeographische und strukturelle Entwicklung Nordwestdeutschlands, 3: Der Zechstein, die Trias. – Berichte der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Arch.-Nr. 115557: 55-82; Hannover [unveröffentlicht].
- KORTE, C., KOZUR, H. & VEIZER, J. (1998): $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ of the Muschelkalk. Comparison to Tethys. – Epicontinental Triassic International Symposium, Halle 1998, Abstracts – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, B, Beihefte 5: 93-94; Halle/Saale.
- KORTE, C., KOZUR, H.W. & VEIZER, J. (2005): $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of Triassic brachiopods and carbonate rocks as proxies for coeval seawater and palaeotemperature. – Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 226: 287-306.
- KOZUR, H. (1974): Biostratigraphie der Germanischen Trias. – Teil I: Freiburger Forschungshefte, C 280/1: 1-56, Teil II: Freiburger Forschungshefte, C 280/2: 1-71; Leipzig.
- KRZYWIEC, P. (2004): Triassic evolution of the Klodawa salt structure: basement-controlled salt tectonics within the Mid-Polish Trough (Central Poland). Geological Quarterly, 48 123-134; Warszawa.
- LEGLER, B. & SCHNEIDER, J. (2008): Marine incursions into the Middle/Late Permian saline lake of the Southern Permian Basin (Rotliegend, Northern Germany) possibly linked to sea-level highstands in the Arctic rift system. – Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 267: 102-114; Amsterdam.
- LEPPER, J., RAMBOW, D. & RÖHLING, H.-G. (2013): Lithostratigraphie des Buntsandstein in Deutschland. – In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Koordination und Redaktion J. LEPPER und H.-G. RÖHLING für die Subkommission Perm-Trias): Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein – Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 69: 69-149; Hannover.
- LGRB (unveröff.): Bohrprofile und Aufschlusssdaten im Archiv des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (Regierungspräsidium Freiburg), Freiburg i. Br., Baden-Württemberg.
- LIPPMANN, R., VOIGT, T., LÜTZNER, H., BAUNACK, C. & FÖHLISCH, K. (2005): Geochemische Zyklen im Unteren Muschelkalk (Typusprofil der Jena-Formation, Steinbruch Steudnitz). – Zeitschrift für geologische Wissenschaften, 33: 27-50; Berlin.
- LOTZE, F. (1933): Die Verbreitung roter Gesteine im Mittleren Muschelkalk Nordwestdeutschlands. – Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, B, Beil.-Bd. 69: 388-396; Stuttgart.
- MATYSIK, M. (2010): Cyclicity in the Middle Triassic shallow-water carbonates – an example from the Muschelkalk of Upper Silesia. – Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 72: 64; Hannover.
- MATYSIK, M. (2019): High-frequency depositional cycles in the Muschelkalk (Middle Triassic) of southern Poland: Origin and implications for the Germanic Basin astrochronological scales. – Sedimentary Geology, 383: 159-180.
- MCKIE, T. & WILLIAMS, B. (2009): Triassic palaeogeography and fluvial dispersal across the northwest European Basins. – Geological Journal, 44: 711-741; Online-Publ. – [doi: 10.1002/gj.1201]
- MUTTI, M. & WEISSERT, H. (1996): Triassic monsoonal climate and its signature in Ladinian-Carnian carbonate platforms (southern Alps, Italy). – Journal of Sedimentological Research, B 65: 357-367.
- PARRISH, J. T. (1993): Climate of the Supercontinent Pangaea. – Journal of Geology, 101: 215-233; Chicago.
- PARRISH, J. T. (1999): Pangaea und das Klima der Trias. – In: HAUSCHKE, N. & WILDE, V. (Hrsg.), Trias, eine ganz andere Welt: Mitteleuropa im frühen Erdmittelalter: 37-42; München (Pfeil).
- PHARAOH, T., DUSAR, M., GELUK, M., KOCKEL, F., KRAWCZYK, C., KRZYWIEC, P., SCHECK-WENDEROTH, M., THYBO, H., VEJBEK, O. & VAN WEES, J.D. (2010): Tectonic evolution. – In: DOORNENBAL, J.C. & STEVENSON, A.G. (eds.): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area: 25-57, Houten (EAGE Publ.).
- PICARD, E. (1915): Mitteilungen über den Muschelkalk bei Rüdersdorf. – Jahrbuch der preußischen geologischen Landesanstalt, 35 (2): 366-372; Berlin.

- PUFF, P. & RADZINSKI, K.-H. (2013): Der Buntsandstein in Westpolen. – In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Koordination und Redaktion J. LEPPER und H.-G. RÖHLING für die Subkommission Perm-Trias): Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein. – Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 69: 625–633; Hannover.
- RADZINSKI, K. (2008): Muschelkalk. – In: BACHMANN, G.H., EHLING, B.-C., EICHNER, R. & SCHWAB, M., Geologie von Sachsen-Anhalt, 201–212; Stuttgart (Schweizerbart).
- RAAB, O. (1907): Neue Beobachtungen aus dem Rüdersdorfer Muschelkalk und Diluvium. – Jahrbuch der königlich preußischen geologischen Landesanstalt, 25: 205–217; Berlin.
- RÖHLING, H.-G. (2013): Der Buntsandstein im Norddeutschen Becken. – In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Koordination und Redaktion J. LEPPER und H.-G. RÖHLING für die Subkommission Perm-Trias): Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein – Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 69: 269–384, 1 Tab; Hannover.
- RÖHLING, H.-G. & LEPPER, J. (2013): Paläogeographie des Mitteleuropäischen Beckens während der tieferen Trias (Buntsandstein). – In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Koordination und Redaktion J. LEPPER und H.-G. RÖHLING für die Subkommission Perm-Trias): Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein – Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 69: 43–67; Hannover.
- ROSENFELD, U. (1978): Beitrag zur Paläogeographie des Mesozoikums in Westfalen. – Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen 156: 132–155; Stuttgart.
- RUPE, I. & NITSCH, E. (2008): Das geologische Landesmodell von Baden-Württemberg: Datengrundlagen, technische Umsetzung und erste geologische Ergebnisse. – LGRB-Informationen, 21: 81 S.; Freiburg i. Br.
- SCHRÖDER, B. (1982): Entwicklung des Sedimentbeckens und Stratigraphie der klassischen Germanischen Trias. – Geologische Rundschau, 71 (3): 783–794; Stuttgart.
- SCHULTZE, H. P. & MÖLLER, U. (1986): Wirbeltierreste aus dem Mittleren Muschelkalk (Trias) von Göttingen, Westdeutschland. – Paläontologische Zeitschrift, 60: 109–129; Stuttgart.
- SCHWARZ, H.U. (1975): Sedimentary structures and facies analysis of shallow marine carbonates (Lower Muschelkalk, Middle Triassic, SW Germany). – Contributions to Sedimentology, 3: 100 S.; Stuttgart.
- SIMON, T. (2004): Rote feinklastische Lagen im Mittleren Muschelkalk Südwest-Deutschlands (Baden-Württemberg). – Geologisches Jahrbuch Hessen, 131: 45–52; Wiesbaden.
- STAMPFLI, G.M. & BOREL, G.D. (2002): A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons. – Earth and Planetary Sciences Letters, 196: 17–33.
- STD 2016 Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.); Redaktion, Koordination und Gestaltung, MENNING, M. & HENDRICH, A.) (2016): Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2016. – Potsdam (GeoForschungsZentrum).
- Szulc, J. (1993): Early Alpine tectonics and Lithofacies Succession in the Silesian Part of the Muschelkalk Basin. A Synopsis. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.), Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991 (= Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, 2): 19–28; Stuttgart, Korb (Goldschneck).
- SZULC, J. (2019): Lower Triassic marine Buntsandstein deposits in the Central European Basin. – Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (German Journal of Geosciences), 170: 311–320; Stuttgart.
- SZYPERKO SLIWZYNSKA, A. (1979): Trias dolny w północno-wschodniej Polsce [Untertrias in Nordost-Polen]. – Prace Instytutu Geologicznego, XCI: 77 S.; Warszawa.
- SZYPERKO-TELLER, A. & MORYC, W. (1988): Roswój basenu sedimentacyjnego pstręgo piaskowca na obszarze Polski [Aufbau des Buntsandstein-Sedimentationsbeckens auf dem Gebiet Polens]. – Kwartalnik Geologiczny, 32 (1): 53–72; Warszawa.
- URLICHS, M. (1999): Cephalopoden im Muschelkalk und Lettenkeuper des Germanischen Beckens. – In: HAUSCHKE, N. & WILDE, V. (Hrsg.), Trias, eine ganz andere Welt: Mitteleuropa im frühen Erdmittelalter: 343–354; München (Pfeil).
- VAN DER ZWAN, C. J. & SPAAK, P. (1992): Lower to Middle Triassic sequence stratigraphy and climatology of the Netherlands, a model. – Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 91: 277–290; Amsterdam.
- VAN WEES, J.-D., STEPHENSON, R.A., ZIEGLER, P.A., BAYER, U., MC CANN, T., DADLEZ, R., GAUPP, R., NARKIEWICZ, M., BITZER, F. & SCHECK, M. (2000): On the origin of the Southern Permian Basin, Central Europe. – Marine and Petroleum Geology, 17: 43–59; Amsterdam.
- WARRINGTON, G., AUDLEY-CHARLES, M.G., ELLIOTT, R.E., EVANS, W.B., IVIMEY-COOK, H.C., KENT, P.E., ROBINSON, P.L., SHOTTON, F.W. & TAYLOR, F.M. (1980): A correlation of the Triassic rocks in the British Isles. – Geological Society of London, Special Report, 13: 78 S.; London.
- WARRINGTON, G. & IVIMEY-COOK, H.C. (1992): TRIASSIC. – In: COPE, J.C.W., INGHAM, J.K. & RAWSON, P.F. (eds): Atlas of Palaeogeography and Lithofacies. – Geological Society London, Memoir, 13: 97–106; London.
- WARRINGTON, G., WILSON, A.A., JONES, N.S., YOUNG, S.R. & HASLAM, H. W. (1999): Stratigraphy and sedimentology. – In: PLANT, J.A., JONES, D.G. & HASLAM, H.W. (eds): The Cheshire Basin: basin evolution, fluid movement and mineral resources in a Permo-Triassic rift setting, 10–40; Keyworth, Nottingham (British Geological Survey).
- WERNICKE, R.S. & LIPPOLT, H.J. (1997): Evidence of Mesozoic multiple hydrothermal activity in the basement at Nonnenmattweiher (southern Schwarzwald), Germany. – Mineralium Deposita, 32: 197–200; Berlin.
- ZIEGLER, P. A. (1982): Triassic rift and facies patterns in western and central Europe. – Geologische Rundschau, 71: 747–772.
- ZIEGLER, P. A. (1990): Geological Atlas of Western and Central Europe. – Second and completely revised edition, 239 pp; Bath (Geological Society Publishing House).

Manuskript eingegangen: 04.03.2020

Annahme zur Veröffentlichung: 24.03.2020

MENNING, M. (2020): Geochronologie des Muschelkalks. – In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Koordination und Redaktion: HAGDORN, H., SIMON, T., für die Subkommission Perm-Trias): Stratigraphie von Deutschland XIII. Muschelkalk. – Schriftenr. Dt. Ges. Geowiss., 91: S. 63-110, 11 Abb., 10 Tab.; Berlin.

1.3

Geochronologie des Muschelkalks

[Geochronology of the Muschelkalk Group]

Manfred Menning

Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Telegraphenberg, D-14473 Potsdam,
e-mail: menne@gfz-potsdam.de

Kurzfassung

Im Muschelkalk ermöglichen zahlreiche lithologische Leitbänke nicht nur nahezu isochrone Korrelationen über weite Teile des Mitteleuropäischen Beckens, sondern begrenzen zugleich nicht wenige sedimentäre Zyklen, denen eine orbital-klimatische Dauer von ≈ 400 ka bzw. ≈ 100 ka zugeschrieben wird. Auf Zyklen basiert die Abschätzung der Dauer des Muschelkalks zu 7,0 Ma, 6,6 Ma, 5,2 Ma bzw. 4,8 Ma. Dagegen basiert die numerische Kalibrierung der Mittleren Trias der Globalen Stratigraphischen Skala (GSS) im Wesentlichen auf radio-isotopischen Altersbestimmungen (RIA) mittels U-Pb-Daten für Zirkon. Die Unterscheidung von TIMS-RIA, CA-TIMS-RIA und Multikorn-RIA, ihre neuartige Integration mit Hilfe von Zeitstrahlen (time lines) und ihre Verknüpfung mit der zyклоstratigraphisch kalibrierten Regionalen Stratigraphischen Skala (RSS) von Mitteleuropa führt zu solideren Zeitskalen sowohl für den Muschelkalk (RSS) als auch für die globale Mittlere Trias (GSS) und einige ihrer Biozonen. Die im Oberen Muschelkalk liegende Anisium-Ladinium-Grenze, die hier nach CA-TIMS-RIA mit $\approx 241,8$ Ma datiert wird, ist die einzige globale Stufengrenze innerhalb der Muschelkalk-Gruppe. Für die Korrelation zwischen dem Muschelkalk und der tethyalen Trias werden marine und palynologische sowie in der Frühen Trias auch magnetostratigraphische Marker genutzt, während die verfügbaren chemostratigraphischen Marker dafür nicht ausreichen. Die Korrelation von GSS und RSS belegt die Signifikanz der Kalibrierung beider Skalen und zeigt einzelne Probleme auf.

Nach der obigen Integration fällt der Beginn der Muschelkalktransgression in Mitteleuropa mit der Prezzo-Transgression in den Südalpen zusammen. Die Nettoakkumulationsraten sind höchst unterschiedlich im Buntsandstein und den Latemar-Karbonaten (≈ 200 m/Ma), im Muschelkalk (≈ 75 m/Ma) und in Beckensedimenten der Alpen (≈ 8 m/Ma). In Mitteleuropa sind Zyklen mit einer Dauer von ≈ 400 ka und ≈ 100 ka (lange und kurze Exzentrizität) typisch

für den Muschelkalk und den Buntsandstein. In den Südalpen charakterisieren Zyklen mit einer Dauer von ≈ 40 ka (Neigung der Erdachse; ≈ 40 cm mächtig) die hemipelagische Buchenstein-Formation, während die oft ≈ 90 cm mächtigen Basiszyklen der neritischen Latemar-Karbonate eine Sub-Milankovitch-Dauer von im Mittel ≈ 4 ka haben. Diese Zeitspannen sind konsistent mit den globalen RIA.

Abstract

In large parts of the Central European Basin lithological marker horizons in the Muschelkalk are not only the base for nearly isochronous correlations but also for boundaries of sedimentary cycles which are interpreted as of orbital-climatical origin and postulated durations of ≈ 400 ka or ≈ 100 ka. The estimation of the duration of the Muschelkalk Group to 7.0 Ma, 6.6 Ma, 5.2 Ma or 4.8 Ma respectively is based on cycles. On the other hand, the numerical calibration of the Middle Triassic of the Global Stratigraphic Scale (GSS) is mainly based on U-Pb radio-isotopic age determinations (RIA) on zircons. The differentiation of TIMS-RIA, CA-TIMS-RIA and multigrain-RIA results in three time lines. Their integration with the cyclostratigraphically calibrated Regional Stratigraphic Scale (RSS) of Central Europe leads to more solid time scales both for the Muschelkalk as well as for the global Middle Triassic (GSS) and for several of its biozones. The Anisian-Ladinian boundary is the only stage boundary within the Muschelkalk and is positioned in its upper part. It has an age of ≈ 241.8 Ma according CA-TIMS-RIA. Marine and palynological markers are used to correlate the RSS and GSS. Complementary, magnetostratigraphic evidence is used for correlation mainly in the Early Triassic whereas available chemostratigraphic markers are not sufficient. The correlation of the GSS and RSS shows the significance of the calibrations and a few problems.

Based on this above integration, the initial Muschelkalk transgression of Central Europe corresponds approximately with the Prezzo transgression in the Southern

Alps. The average netaccumulation rates are strongly different in the Buntsandstein and Latemar carbonates (≈ 200 m/Ma), the Muschelkalk (≈ 75 m/Ma) and hemipelagic successions of the Alps (≈ 8 m/Ma). Cycle durations of ≈ 400 ka and ≈ 100 ka (long and short eccentricity) are typical for the Muschelkalk of Central Europe. In the Southern Alps, cycles of ≈ 40 ka (obliquity; ≈ 40 cm thick) duration characterize the hemipelagic Buchenstein Formation. The in average ≈ 90 cm thick basic cycles of the Latemar carbonates are of sub-Milankovitch duration of in average ≈ 4 ka. These durations are consistent with global RIA.

Schlüsselwörter: Mittlere Trias, Deutschland, Alpen, Ungarn, China, Biozonen, Milankovitch-Zyklizität, Akkumulationsraten, Transgression

Keywords: Middle Triassic, Germany, Alps, Hungary, China, biozones, Milankovitch cyclicity, accumulation rates, transgression

1. Einleitung

Unter Geochronologie wird zumeist die physiko-chemische Altersbestimmung von Gesteinen mit Hilfe radiogener (instabiler) Isotope verstanden. Hier werden dazu neben den beiden grundlegenden geochronometrischen Methoden, der radio-isotopischen Altersbestimmung (RIA) und der zylostratigraphischen (orbitalen, astrochronologischen, astronomischen) Kalibrierung auch die Methoden zur Integration dieser Daten mittels Lithostratigraphie, Leitbankstratigraphie (Allostratigraphie), Biostratigraphie, Magnetostratigraphie und Chemostratigraphie gerechnet. Letztere sind unverzichtbar für die Verifizierung und Verknüpfung der geochronometrischen Daten und damit für die Korrelation der Globalen Stratigraphischen Skala (GSS) mit der Regionalen Stratigraphischen Skala (RSS) von Mitteleuropa. So konstatieren BRACK et al. (1999: 853): *The precise age calibration of the Germanic Triassic and, in particular, the Muschelkalk is an old problem which still awaits full solution.* Dieses Problem besteht nach wie vor, weil die Korrelation der Unter- und Obergrenze des Muschelkalks und seiner internen Grenzen mit der tethyalen Trias bis heute unterschiedlich gesehen wird. Auch die globalen RIA bedürfen einer besseren Integration, denn *Radio-isotopic data for the Middle Triassic are scarce, often contradictory and poorly correlated between marine biozones and dated rocks* (JENKS et al. 2015: 353).

In diesem Beitrag wird versucht, mit einem integrativen Ansatz zu einer wesentlich präziseren numerischen Kalibrierung des Muschelkalks und der globalen Mittleren Trias und ihrer Faunenzonen sowie zu einer

besseren Korrelation zwischen der Regionalen (RSS) und der Globalen Stratigraphischen Skala (GSS) zu kommen. Erst auf einer verbesserten stratigraphischen Grundlage können solidere paläogeographische Modelle entstehen. Dazu schreibt PIA (1930: 106 f.) in Bezug auf Österreich und Deutschland: *Die gezogenen Grenzen entsprechen in verschiedenen Teilen des [...] Gebietes kaum der gleichen Zeit. Dazu kommt, daß vielfach auch gar nicht das Bestreben bestand, die Grenzen wenigstens nach Möglichkeit synchron zu machen. Jede Landesanstalt oder jede Schule ist so ziemlich ihre eigenen Wege gegangen, vorwiegend bestrebt, die Grenzen so zu legen, wie sie den örtlichen Verhältnissen entsprechen und im Gelände gut zu erkennen sind, aber ohne genügende Rücksicht auf den Anschluß an andere Gegenden. [...] Wir haben mit der doppelten Schwierigkeit zu kämpfen, daß die nur faziell definierten Grenzen schon in der Natur selbst in verschiedenen Gegenden zeitlich voneinander abweichen und daß außerdem bewußtermaßen gewisse Faziesgebilde in verschiedenen Landesteilen verschieden zugerechnet wurden. Dazu kommt noch eine sehr schwerfällige und wechselnde Namengebung.*

Aus diesen Gründen arbeitet die Subkommission Perm-Trias der Deutschen Stratigraphischen Kommission in den Beckenfazies weitestmöglich mit annähernd isochronen Grenzen, selbst für lithostratigraphische Einheiten wie Formationen und Gruppen, wo dies möglich ist, anstatt mit den für die Beckenränder typischen oft diachronen Faziesgrenzen. Diese allostratigraphische Arbeitsweise basiert auf Sedimentzyklen, denen oft und auch hier eine orbital-klimatische Genese zugeschrieben wird, und auf Bündeln solcher Zyklen, den Folgen. Ihre geschätzte Dauer bildet die Grundlage für die numerische Kalibrierung der RSS. Indem die Buntsandsteinzyklen einbezogen werden, die mit der GSS besonders gut korreliert sind, können die außergewöhnlich zahlreichen globalen RIA vom spätesten Perm bis zur Mittleren Trias für die Überprüfung der zylostratigraphisch kalibrierten RSS genutzt werden.

Abkürzungen: CA-TIMS – Chemical abrasion-thermal ionisation mass spectrometry mit U-Pb an Zirkon, ESTD 2005 – Erläuterungen 2005 zur Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002 (STD 2002), FAD – first appearance datum, FOD – first occurrence datum, GSS – Globale Stratigraphische Skala, GSSP – Global Stratotype Section and Point, LAD – last appearance datum, LOD – last occurrence datum, RIA – Radio-isotopische Altersbestimmung(en), RSS – Regionale Stratigraphische Skala, STD 2016 – Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2016, STDK 2012 – Stratigraphische Tabelle von Deutschland Kompakt 2012, TIMS – Thermal ionisation mass spectrometry mit U-Pb an Zirkon

2. Stratigraphische Grundelemente

Nach dem Vorbild der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland Kompakt 2012 (STDK 2012), der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016 (STD 2016) und der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland Kompakt 2017 (STDK 2017) wird hier mit den selbsterklärenden Begriffen Globale Stratigraphische Skala (mit globalen stratigraphischen Einheiten) und Regionale Stratigraphische Skala (mit regionalen stratigraphischen Einheiten) gearbeitet.

2.1 Globale Stratigraphische Skala (GSS)

Tab. 1 zeigt die Muschelkalk-Gruppe in Relation zu Stufen und (informellen) Unterstufen der GSS.

Anisium – nach dem Fluss Enns (lat. Anisus) in Österreich. Umfasst nach ursprünglicher Definition die Balatonische und Bosnische Unterstufe (MOJSISOVIC et al. 1895: 1292; ASSERETO 1971, ZAPPE 1974); formale Begründung in SUMMESBERGER & WAGNER (1972).
Typlokalität: Großreifling (Steiermark).

Substufen: Aegaeum, Bithynium, Pelsonium, Illyrium (informell).

GSSP-Kandidat: Desli Cairn, Dobrudscha, Rumänien (45.0742 ° N, 28.8022 ° E); dort Koinkidenz von Ammoniten-FOD (*Paracrochordiceras*) und Conodonten-FOD.

Basis: FOD des Conodonten *Chiosella timorensis* an der Basis von Bank GR7 bei ca. 7 m (GRÄDINARU et al. 2007: 62); 2,5 m über dem FOD von *C. timorensis*: Basis einer 19,4 m mächtigen normal polarisierten Magnetozone (GALLET et al., in GRÄDINARU et al. 2007: 63–66).

Numerisches Alter der Basis: 247,2 Ma (nach der in der vorliegenden Arbeit entworfenen CA-TIMS time line, die im Bereich der Anisium-Basis auf RIA von LEHRMANN et al. 2006 und OVTCHAROVA et al. 2015 basiert).

Aegaeum – nach der Ägäis (Griechenland, Türkei); älteste Substufe des Anisiums; *Paracrochordiceras*-Schichten. Begründung: ASSERETO (1974: 36).

Typlokalität: Mt. Marathovouno, Chios, Griechenland.

Basis: Wie Basis Anisium.

Numerisches Alter der Basis: siehe Anisium: 247,2 Ma

Bithynium – nach dem antiken Bithynien (= Kocaeli Halbinsel, Türkei). Zweite Substufe des Anisiums. Begründung: ASSERETO (1974: 35). Nach TOZER (1984) nicht vom Pelsonium trennbar.

Typlokalität: Eisenbahneinschnitt der ehem. Bagdadbahn-Trasse bei Gebze, Kocaeli-Halbinsel (FANTINI-SESTINI 1988, 1989).

Basis: FOD des Ammoniten *Silberlingites muelleri* und FOD des Conodonten *Paragondolella bulgarica*; nach BACHMANN & KOZUR (2004) gleichfalls FAD der Muscheln *Costatoria costata* mit 16–17 extraarealen Rippen und *Myophoria vulgaris* sowie im kontinentalen Bereich FAD des Conchostraken *Euestheria albertii albertii*. Dabei ist zu beachten, dass Angaben von Taxa über große Distanzen keine Gewähr für eine nahezu isochrone Korrelation sein können, was besonders kritisch zu beurteilen ist, wenn phylogenetische Reihen nicht bekannt sind.

Numerisches Alter der Basis: ≈ 246,8 Ma (nach der in der vorliegenden Arbeit entworfenen CA-TIMS

time line, die im Bereich spätes Spathium – frühestes Pelsonium auf den RIA von LEHRMANN et al. 2006 basiert).

Pelsonium – nach dem Plattensee (Balaton, latinisiert von PIA 1930), ersetzt das Balatonium. *Schreyerites binodosus*-Zone (oder *Balatonites balatonicus*-Zone). Dritte Substufe des Anisiums. Begründung: MOJSISOVIC et al. (1895: 1293) „Balatonisch“. Typlokalität: Aszofö, Balaton-Oberland. Basis: Schicht II/28, FOD des Ammoniten *Balatonites balatonicus* (VÖRÖS et al. 2003). Numerisches Alter der Basis: ≈ 246,4 Ma (nach der

Globale Stratigraphische Skala (GSS)				Regionale Stratigraphische Skala (RSS)		
PERIODE SYSTEM	EPOCHESERIE	STUFE	Substufe (informell)	häufig Gruppe	alternativ diese Arbeit Gruppe	
TRIAS	SPÄTE TRIAS	RHAETIUM	-	Keuper	Keuper	
		NORIUM	Lac.\Alaun.\Sevatium			
		KARNIUM	Cordevol.\Julium\Tuval.			
	MITTLERE TRIAS	LADINIUM		Longobard. Langob.	Muschelkalk	Muschelkalk
				Fassanium		
				Illyrium		
				Pelsonium		
				Bithynium		
				Aegaeum		
	FRÜHE TRIAS	OLENEKIUM INDUSIUM	Smithium\ Spathium Griesbach.\Diener.	Buntsandstein	Buntsandstein	

Tab. 1: Die Muschelkalk-Gruppe in Relation zu globalen Stufen und Unterstufen

in der vorliegenden Arbeit entworfenen CA-TIMS time line, die im Bereich spätes Spathium – frühestes Pelsonium auf den RIA von LEHRMANN et al. 2006 basiert).

Illyrium – nach dem antiken Illyrien (Bosnien); von PIA (1930: 97) latinisiert aus MOJSISOVICS et al. (1895: 1293) „Bosnisch“. Jüngste (vierte) Substufe des Anisiums. Begründung: ASSERETO (1974: 32).

Typlokalität: nicht festgelegt, sollte wohl die Ammonitenfundstelle Han Bulog (Bosnien) sein.

Basis: FOD des Ammoniten *Schreyerites abichi* (MIETTO & MANFRIN 1995).

Numerisches Alter der Basis: $\approx 244,5$ Ma (nach der in der vorliegenden Arbeit entworfenen CA-TIMS time line, die im Bereich spätes Pelsonium – frühes Illyrium auf der RIA CHIN 34 von OVTCHAROVA et al. 2006 basiert).

Ladinium – nach dem romanischen Volksstamm der Ladiner in den Dolomiten (Italien), von BITTNER (1892: 392) begründet. Buchensteiner und Wengener Schichten, unterer Abschnitt der Cassianer Schichten.

Substufen: Fassanium, Longobardium | Langobardium. Basis nach Ammoniten: FOD von *Eoprotrachyceras curionii*, Basis der *E. curionii*-Zone (BRACK et al. 2005); ein sekundärer Marker ist das FOD des Conodonten *Neogondolella praehungarica* im höchsten Anisium.

GSSP: ratifiziert 2005, südlich von Bagolino, ca. 150 m ESE der Ponte di Romanterra, Lombardische Alpen, Italien (45°49'09,5"N, 10°28'15,5"E) (BRACK et al. 2005, <http://www.stratigraphy.org/GSSP/Ladinian.html>, 05.05.2017); knapp 7 m über der Basis der Buchenstein-Formation; dort Basis einer 15 bis 20 cm mächtigen Kalksteinbank im Hangenden einer Hohlkehle („Chiesense-groove“) mit Knollenkalken in toniger Matrix. Tuffe, markante vulkanoklastische Horizonte um den GSSP herum, lieferten relevante RIA, mit denen das Alter der Stufengrenze abgeschätzt wurde.

Numerisches Alter der Basis: $\approx 241,8$ Ma (nach der in der vorliegenden Arbeit entworfenen CA-TIMS time line in Kombination mit der TIMS time line und den Mächtigkeiten der Ammonoideenzonen in der Buchenstein-Formation).

Bemerkung: Mit der Einführung des GSSP für die Ladinium-Stufe wurde das Anisium in der Fassung von BITTNER (1892) um $\geq 1,2$ Ma erweitert auf Kosten des Ladiniums, speziell des Fassaniums (siehe auch Fassanium).

Fassanium – nach Val di Fassa (Dolomiten, Italien), von MOJSISOVICS et al. (1895: 1297) eingeführt für Bu-

chensteiner Schichten und Marmolada-Kalk. Ältere Substufe des Ladiniums.

Basis: wie Basis Ladinium.

Numerisches Alter der Basis: $\approx 241,8$ Ma (siehe Ladinium).

Bemerkungen: (1) Der untere Teil des Fassaniums sensu MOJSISOVICS et al. (1895) gehört heute zur Anisium-Stufe: am GSSP für die Ladinium-Stufe bei Bagolino sind dies die unteren knapp 7 m der Buchenstein-Formation. (2) Die Basis des Longobardiums | Langobardiums ist bisher nicht festgelegt (siehe dort). Da MOJSISOVICS et al. (1895) die Buchensteiner Schichten als Fassanium bezeichneten und in diesen die Ammonitenzone *E. curionii* und zum großen Teil auch die Zone *Protrachyceras gredleri* liegen, gehört diese in das Fassanium. Somit endet der Muschelkalk eindeutig in der Fassanium-Unterstufe (VISSCHER et al. 1993) und nicht wie nach KOZUR (1975) in der Longobardium-|Langobardium-Unterstufe (beide in HAGDORN & SEILACHER 1993: hinterer Innendeckel).

Longobardium | Langobardium – nach dem germanischen Volksstamm der Langobarden, die in der Völkerwanderungszeit in Oberitalien (Lombardei) siedelten, von MOJSISOVICS et al. (1895: 1298) eingeführt. Jüngere Substufe des Ladiniums.

Basis: bisher nicht festgelegt. *P. gredleri* / *P. margaritosum*-Zone, durch Ammoniten schlecht definiert; BACHMANN & KOZUR (2004) wie auch andere bevorzugen die Basis der *Protrachyceras archelaus*-Zone.

Numerisches Alter: $\approx 239,2$ Ma (nach der in der vorliegenden Arbeit entworfenen CA-TIMS time line auf der Basis der RIA von BRÜHWILER et al. 2007 und SEC-G von WOTZLAW et al. 2018).

Karnium – nach den Karnischen Alpen (Österreich, Italien), vielleicht auch nach dem österreichischen Bundesland Kärnten (Carinthia); von MOJSISOVICS (1869: 127 f.) als Karnische Stufe eingeführt. Älteste Stufe der Späten Trias.

GSSP: ratifiziert 2008, FOD des Ammoniten *Daxatina canadensis* (*canadensis*-Subzone der *Trachyceras*-Zone), Stuores Wiesen bei St. Kassian, Dolomiten, Italien, 45 m über der Basis der Cassiano-Formation (MIETTO et al. 2012).

Numerisches Alter der Basis: $\leq 237,0$ Ma (unsicheres Alter: nach einer CA-TIMS RIA von 237,77 \pm 0,14 Ma von MIETTO et al. 2012 von deutlich unterhalb der Ladinium-Karnium-Grenze in Kombination mit der Zuordnung von 400 ka zu den Kleinzyklen von NITSCH et al. 2005: Tab. 3: max. 10 Zyklen im k2; NITSCH 2018: 190 und Kap. 6.1: Abschn. 6: 4 Zyklen im k1).

2.2 Regionale Stratigraphische Skala (RSS)

Tab. 2 zeigt die lithostratigraphische und allostratigraphische Gliederung der Muschelkalk-Gruppe in Deutschland.

3. Regionale Korrelation

3.1 Lithostratigraphie

Die Muschelkalk-Gruppe wird anhand von annähernd isochronen Leitbänken in die regionalen geochronologischen Einheiten der Folgen m1 bis m9 gegliedert, die – außer Folge m6 und m8 – in jeweils zwei Subfolgen unterteilt werden (Kap. 5). Im Hauptbecken und im zentralen Bereich des Süddeutschen Teilbeckens entsprechen die Folengrenzen weitgehend (lithostratigraphischen) Grenzen der Formationen und Subformationen. Gegen die Beckenränder und im Bereich regionaler Paläohochs verändern sich die Lithofazies i. A. entlang von diachronen Grenzen; das gilt im deutschen Anteil des Mitteleuropäischen Beckens v. a. für die randlichen Bereiche des Süddeutschen Teilbeckens (Kap. 8.1 bis 8.5). Außerdem zeigen rhythmisch wechselnde Kalk- und Tonanteile Zyklen verschiedener Ordnung an, die z. T. über Lithofaziesgrenzen hinweg die Korrelation von Bohrungen und Tagesaufschlüssen erlauben (Kap. 6.1; Abschn. 5.2, Tab. 6). Damit ist eine zeitliche Korrelation über große Distanzen und eine hochauflösende Stratigraphie möglich, die im marinen Muschelkalk zusätzlich durch biostratigraphische Eichung gesichert wird (Kap. 4.1 bis 4.10).

3.2 Biostratigraphie

Die Biozonierung im Muschelkalk beruht auf Cephalopoden und Conodonten, zusätzlich auf Brachiopoden, Echinodermen, Ostrakoden, Bivalven, Dasycladaceen, Palynomorphen und marinen Reptilien (Kap. 4.1 bis 4.10). Am besten ist die zonale Auflösung im Oberen Muschelkalk anhand von 15 Ceratitenzonen und sechs Conodontenzonen, die allerdings wegen weitgehend endemischer Entwicklung der Indexformen für die Korrelierung mit der tethyalen Mitteltrias nur bedingt geeignet sind. Den seltenen Funden tethyalen Ammonoiten im Unteren und Oberen Muschelkalk kommt für die Korrelation größere Bedeutung zu (Kap. 4.2), genauso den Conodonten des Unteren Muschelkalks (Kap. 4.3).

Lithostratigraphie				Allostratigraphie	
Gruppe	Untergruppe	Formation (Auswahl)		Leitbank (Auswahl)	Folge
		Hauptbecken	Südliches Teilbecken		
Keuper	Unterer Keuper	Erfurt	Erfurt	Grenzbonebed (UG)	k1
Muschelkalk	Oberer Muschelkalk (mo)	Warburg	Meißner	Hauptterebatelbank	m9
				Cycloidesbank (OG)	m8
		Meißner	Trochitenkalk	Spiriferinabank (OG)	m7
				Hornsteinbank (UG)	
	Mittlerer Muschelkalk (mm)	Diemel	Diemel	Lauffen-Horizont (UG)	m6
		Heilbronn	Heilbronn	Wutha-Karbonat	m5
		Karlstadt	Karlstadt	Remlingen-Dolomit (OG)	m4
	Unterer Muschelkalk (mu)	Jena	Jena	Schaumkalkbank 3 (OG)	m3
				Ob. Terebratelbank (OG)	m2
Oolithbank 2 (OG) Grenzgelbkalk (UG)				m1	
Buntsandstein	Oberer Buntsand.	Röt	Röt	Sulfat 3	s7

OG = Obergrenze UG = Untergrenze

Tab. 2: Lithostratigraphie und Allostratigraphie der Muschelkalk-Gruppe in Deutschland

4. Überregionale Korrelation

4.1 Lithostratigraphie und Zyklostratigraphie

Eine Korrelation mit Hilfe von Leithorizonten und/oder Bohrlochmessungen ist i. d. R. nur innerhalb eines Sedimentationsraums möglich. Aus dem Germanischen Becken heraus kann lithostratigraphisch bestenfalls über die temporären Pforten zur Tethys korreliert werden. MOSTLER (1993) sieht dafür Möglichkeiten, weil es im Unteren und Mittleren Muschelkalk deutliche Beziehungen zur tethyalen Trias gibt und weil beide Gebiete *geotektonisch betrachtet einem einheitlichen Ablagerungsraum zuzuordnen sind*. Mitteltriassische Gesteine aus anderen Peritethys-Bereichen, z. B. der „Sephardischen Trias“ in Spanien, Südfrankreich, Nordafrika und Palästina sind der Germanischen Trias ähnlicher als der alpinen Trias (TÖRÖK 1993: 133).

So ist Karl-Christian Käding (schriftl. Mitt. 07/2018) fest davon überzeugt, dass sogar eine zyклоstratigraphische Korrelation zwischen den zyklisch strukturierten Sedimenten des Germanischen Beckens und der Bohrung Gartnerkofel-1 (SCHMÖLLER 1991), die in flachmarinen Abfolgen der westlichen Tethys steht, möglich ist. Daran zweifelnde Kollegen sollten durch die Publikation einer Korrelationskette die Möglichkeit erhalten, sich von der Relevanz der Parallelisierung zu überzeugen. Eine sichere Korrelation mit Hilfe von Zyklen im Sinne von K.-C. Käding, die der Autor hier genetisch neutral auch „Korrelations-einheiten“ nennt, wäre extrem wertvoll, könnten doch die RIA aus dem Alpenraum weit präziser als bisher

in die Abfolge des Germanischen Beckens übertragen und für deren numerische Kalibrierung genutzt werden (Abschn. 6).

4.2 Biostratigraphie

Die Biozonierung der marinen Mitteltrias beruht auf Ammoniten und Conodonten (Zusammenfassungen bei BALINI et al. 2010, ORCHARD 2010, JENKS et al. 2015), daneben auf weiteren Mikro- und Makrofos-silgruppen (Beiträge in LUCAS 2010 und in Kap. 4.4 bis 4.10). Allerdings divergieren Zahl, Benennung und Abgrenzung einiger Biozonen sowie deren Zuordnung zu Unterstufen zwischen verschiedenen Autoren und auch z. T. in Arbeiten desselben Autors. Im Folgenden wird auf die Zonen und Korrelationen Bezug genommen, die für den vorliegenden Beitrag relevant sind (Abschn. 6).

4.3 Magnetostratigraphie

Aus dem Muschelkalk von Deutschland liegen bisher nur sehr begrenzte Ergebnisse zur Magnetostratigraphie vor, so dass eine Korrelation mit magnetostratigraphisch bearbeiteten Profilen außerhalb des

Germanischen Beckens noch nicht möglich ist. Eine Ausnahme ist der Übergangsbereich Buntsandstein/Muschelkalk, der normal polarisiert ist (SZURLIES 2007: Fig. 8: rechts oben). Dieser Bereich wird von diesem Autor als normal polarisierte Zone CG12n bezeichnet, nach MENNING & KÄDING (2013: Abb. 6.7.3-1) ist es die Zone sn12, die in die Zyklen s7.12 und m1.1 fällt und die durch ein Dutzend Proben von der Fliegerrutsche bei Dornburg (Myophorienschichten, Dornburg-Subformation des höchsten Buntsandsteins) und dem Tagebau Steudnitz bei Dornburg (unterste Jena-Formation, tiefster Muschelkalk) sicher belegt ist. In Verbindung mit der palynostratigraphischen Korrelation von VISSCHER et al. (1993) ist diese eindeutige Aussage die Grundlage für die Korrelation mit dem Profil von Chios in Griechenland (MUTTONI et al. 1994) und damit für den Anschluss der RSS an die GSS: Die Stufengrenze Olenekium-Anisium liegt im Röt etwas oberhalb der Grenze der Zyklen s7.2 und s7.3 (Abb. 1).

In Nordwest-Polen hat NAWROCKI (1997: Fig. 12: rechts) eine normal polarisierte Bohrkern-Probe im tiefsten Muschelkalk dokumentiert. Sie gehört zweifelsfrei in die Zone sn12/CG12n. Indem NAWROCKI & SZULC

Global Stratigraphic Scale (GSS)								Regional Stratigraphic Scale (RSS)							
PERIOD	EPOCH	STAGE	Substage	Age (Ma)	Formation	Tethyan Ammono- noid Zone	Polarity	Correlation Magneto- zones	Polarity	Cycle	Folge	For- mation	Group	Super- group	
TRIASSIC	MIDDLE TRIASSIC	ANISIAN	Pelsonian	246	Marmortrapeza	Aegeiceras/ Japonites	↑	s12n	↑	MU1	m1	Jena	Muschel- kalk	Buntsandstein	Germanic Triassic
			Bithynian	246.5				s11r	↓	s7.12	s7	Röt			
								s7.11	↓						
								s7.10	↓						
								s7.9	↓						
	s7.8	↓													
	s7.7	↓													
	s7.6	↓													
	s7.5	↓													
	s7.4	↓													
	s7.3	↓													
	s7.2	↓													
	s7.1	↓													
	s6.3	↓													
	s6.2	↓													
s6.1	↓														
s5.12	↓														
s5.11	↓														
s5.10	↓														
s5.9	↓														
EARLY TRIASSIC	OLENEKIAN	Spathian	Aegean	247	Prohungarites- subcolumbites	↓	C+	s11n	↑	s6.1	s6	Solling	Buntsandstein	Germanic Triassic	
			A+	s10r			↓	s5.12	s5	Har- deg- sen					
				s10r			↓								
				s9r			↓								
				s8r			↓								
s8n	↓														

Abb. 1: Die palynostratigraphische Grenze Olenekium–Anisium im Oberen Buntsandstein (Röt) magnetostratigraphisch präzisiert

(2000) davon ausgehen, dass nicht nahezu das ganze Röt ins Anisium gehören könne, kommen sie magnetostratigraphisch zu einer Position der Olenekium-Anisium-Grenze etwas unterhalb der Obergrenze des Röts deutscher Fassung. Diese Position ist einmalig (Abb. 6) und steht im Widerspruch zu den biostratigraphischen und numerischen Zeitindikationen.

Magnetostratigraphische Pionieruntersuchungen von DACHROTH (1973) aus der Randfazies des westlichen Germanischen Beckens konnten noch keine relevanten Ergebnisse bringen, weil ihm Abmagnetisierungstechnik für eine hinreichende magnetische Säuberung der Proben noch nicht zur Verfügung stand und weil die Profile nicht sicher mit der Schichtenfolge des zentralen Muschelkalkbeckens bzw. des Südlichen Teilbeckens korreliert sind. Für die vorliegende Arbeit wurde jede Probe einzeln nach denselben Kriterien wie im Buntsandstein nachinterpretiert (MENNING & KÄDING 2013).

Im Profil „Auf der Ell“ bei Merzig/Saar (DACHROTH 1973: Abb. 1, Unterer Muschelkalk) fallen die meisten Proben weder in das Typusgebiet für normale noch inverse Proben (vgl. MENNING & KÄDING 2013). Einige Proben im mittleren und höheren Profil sind normal polarisiert. Invers polarisiert ist nur eine einzige Probe (Nr. 573) aus dem tieferen Unteren Muschelkalk entsprechend ihrer Deklination nach SSW. Aufgrund einzelner invers magnetisierter Teilproben (nach der Deklination, nicht nach der Inklinaton der remanenten Magnetisierung) kann aber angenommen werden, dass der Bereich der Proben 566 bis 573 (tieferer Unterer Muschelkalk) ursprünglich invers polarisiert war. Die normal polarisierten Proben 574 und 575 stammen aus den untersten zehn Metern des Muschelkalks, einem Kalksandstein (DACHROTH 1973: 46/47). Sie gehören eventuell noch in die Zone sn12/CG12n, sofern diese sehr lang sein sollte, denn „Die Muschelkalk-Fazies im Saarland beginnt wahrscheinlich erst im Niveau der Oolithbänke“ (E. Nitsch, schriftl. Mitt. 21.5.2019).

Im Profil „Schankengräecht“ bei Pratz (Luxemburg) fällt keine der 27 Proben aus dem Unteren, Mittleren und untersten Oberen Muschelkalk in das inverse Typusgebiet. Neun Proben fallen in das Typusgebiet für normale Polarität. Dies reicht nicht für eine magnetostratigraphische Interpretation.

4.4 Chemostratigraphie

Die Chemostratigraphie korreliert sedimentäre Abfolgen zumeist aquatischen/marinen Milieus mit Hilfe von Elementanomalien (z. B. S, V, Cr, Ir) und radiogenen und stabilen Isotopen (z. B. $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{34}\text{S}$) (WEISSERT et al. 2008). Diese Anomalien sind z. T. so markant, dass mit ihnen sogar GSSPs

definiert worden sind, so die Basis des Holozäns mit einer Deuterium-Anomalie, die Basis der Ypresium-Stufe mit einer $\delta^{13}\text{C}$ -Anomalie und die Kreide-Tertiär-Grenze mit der bekannten Ir-Anomalie. Aus dem Muschelkalk sind derartige geochemische Anomalien bisher nicht bekannt.

4.5 Sequenzstratigraphie und Meeresspiegelschwankungen

Sequenzstratigraphie interpretiert und korreliert Ablagerungssysteme vor allem an passiven Kontinentalrändern und in Epikontinentalmeeren. Im Unterschied zu klimatisch induzierten Zyklen im Sinne von Milankovitch wohnt den Sequenzen keine Zeitinformation inne, die zur Kalibrierung des Muschelkalks genutzt werden könnte. In die von HAQ et al. (1988) vorgelegte Kurve der globalen Schwankungen des Meeresspiegels ist der Muschelkalk nicht integriert. Der Begriff Muschelkalk taucht dort lediglich in Fig. 17 auf, wo er vereinfachend mit den globalen Stufen Anisium und Ladinium gleichgesetzt ist. Eine Nutzung von Meeresspiegelschwankungen für eine verfeinerte Korrelation des Muschelkalks mit der GSS ist nicht bekannt.

4.6 Radio-isotopische Altersbestimmungen

Aus dem Muschelkalk selbst sind keine radio-isotopischen Altersbestimmungen bekannt, weil sowohl zirkonführende Tuffe für die U-Pb- als auch Schwarzschiefer für die Re-Os-Altersbestimmung fehlen. Sie sind auch nicht bekannt aus dem Liegenden und Hangenden, dem höheren Zechstein, dem Buntsandstein und dem Keuper. Für die numerische Kalibrierung des Muschelkalks stehen deshalb nur RIA aus anderen Regionen der Erde und dessen Zyklen zur Verfügung.

5. Numerische Kalibrierung

Die Globale Stratigraphische Skala (GSS) wird mit Hilfe der verfügbaren RIA detaillierter als üblich kalibriert. Dabei zeigt sich, dass die Bestimmung der absoluten Alter von der Art der U-Pb-Datierung abhängt, die sich signifikant fortentwickelt hat, so dass nicht alle Alter direkt verglichen werden können (Abschn. 5.1): Eindeutig zu empfehlen ist eine Zeitskala auf der Basis von CA-ID-TIMS-Altersbestimmungen, welche die am höchsten entwickelte und aktuell am meisten genutzte Methodik zur U-Pb-Altersbestimmung an Zirkonen ist (Abschn. 5.1.2. bis 5.1.4). Dagegen ist der Muschelkalk zyklustratigraphisch (astrochronologisch, astronomisch, orbital) kalibriert, wobei das Für und Wider von drei derart abgeleiteten regionalen Zeitskalen abgewogen wird (Abschn. 5.2).

5.1 Globale Stratigraphische Skala

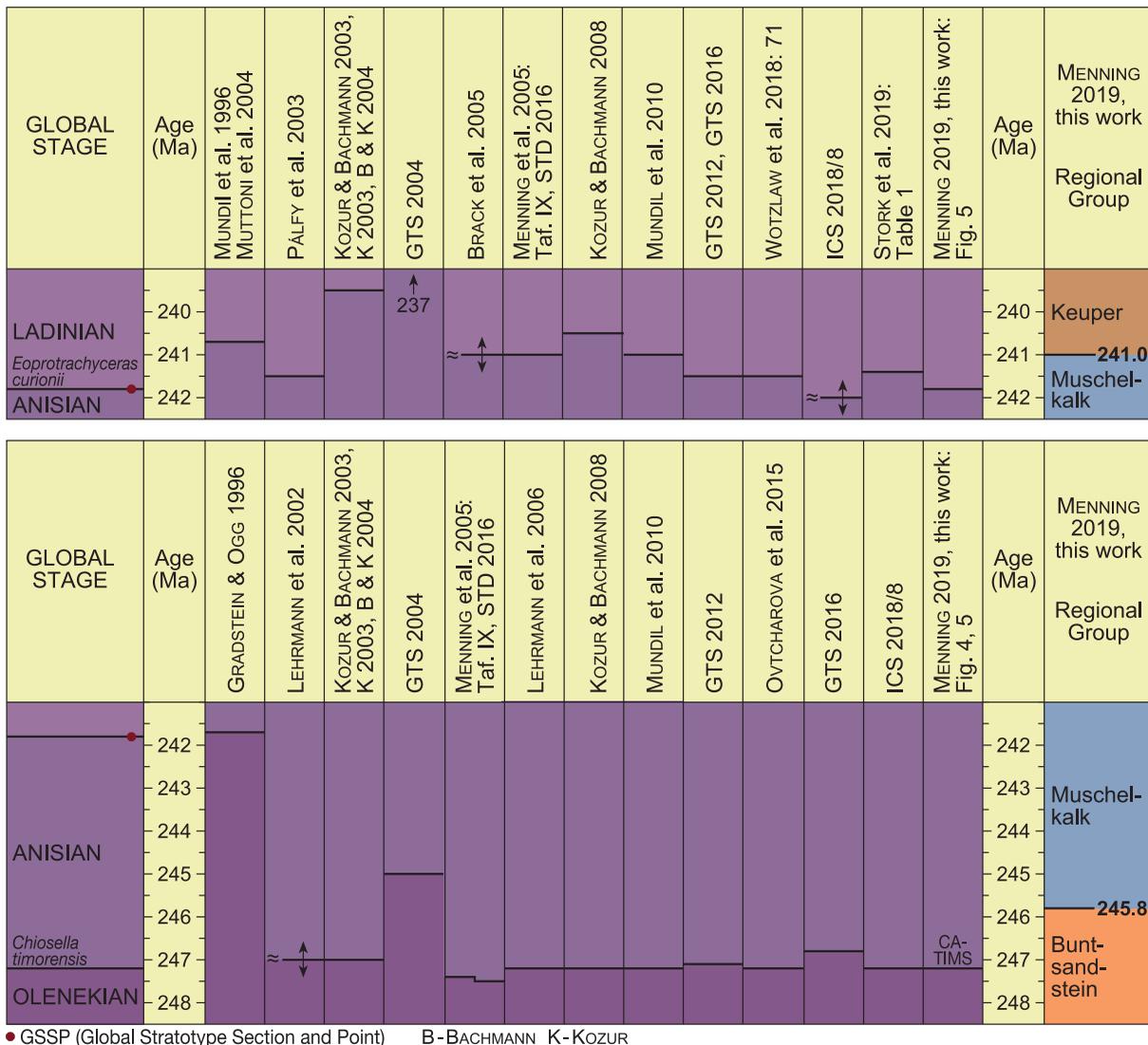
Zu ihrer Zeit war die ⁴⁰Ar/³⁹Ar-Altersbestimmung von HELLMANN & LIPPOLT (1981) eine Sensation. Das Alter von 233 ± 9 Ma für Hochsanidine aus Bentoniten der Grenzbitumenzone am Monte San Giorgio (Tessin, Schweiz) war damals die beste numerische Altersbestimmung für die Trias überhaupt (vgl. Abb.5). Auf ihrer Basis wurde die traditionelle Anisium-Ladinium-Grenze auf 232 Ma und die Perm-Trias-Grenze auf 250 Ma abgeschätzt im Unterschied zu dem zuvor für die Perm-Trias-Grenze oft verwendeten Alter von 225 Ma (GTS 1964).

5.1.1 Zeitindikationen

5.1.1.1 Radio-isotopische Altersbestimmungen

Heute stehen für die Kalibrierung der Stufen Anisium und Ladinium (globale Mittlere Trias) RIA aus den Dolomiten (Nord-Italien), dem Bakony-Hochland nördlich des Plattensees (Ungarn), dem Tessin (Schweiz) sowie dem Nanpanjiang-Becken in Guizhou und

Guangxi (Südchina) zur Verfügung. Zumeist sind sie solide eingebunden in Conodonten und Ammoniten-Zonierungen und damit untereinander vergleich- und korrelierbar. Sie sind aber im Detail nicht konsistent zueinander, weil die in Massenspektrometern untersuchten Zirkone unterschiedlich präpariert wurden und damit zwangsläufig leicht variierende Alter ergaben. Es wird aber davon ausgegangen, dass alle diese RIA relevant sind, auch wenn es zunächst Zweifel gab, weil (1) sie die Dauer von 20 ka je Latemar-Zyklus in Frage stellten (s. u.), (2) durch die RIA die Stufen Anisium und Ladinium noch kürzer und die Stufen Karnium und Norium noch länger wurden, als sie bereits ohnehin abgeschätzt waren, und (3) die als überlang empfundene Zeit für den Keuper weiter ausgedehnt wurde, während die schon bemerkenswert kurzen Zeitspannen für den Muschelkalk und Buntsandstein weiter schrumpften (MENNING 1990 vs. MENNING et al. 2005). So steht im Keuper viel mehr Zeit zur Verfügung, als mit seinen Sedimenten gefüllt werden kann, so dass zwingend Schichtlücken mit einer Dauer von



● GSSP (Global Stratotype Section and Point) B-BACHMANN K-KOZUR

Abb. 2: Numerische Alter der Anisium-Stufe 1996–2019 und das Alter des Muschelkalks

mehreren Millionen Jahren anzunehmen sind (STD 2016, Variante Keuper A, NITSCH 2018). Zweifel an der „Überlänge“ der Späten Trias (Karnium, Norium, Rhaetium) und des Keupers (mittleres Ladinium bis Rhaetium) wurde durch die RIA von $237,77 \pm 0,14$ Ma aus dem späten Ladinium (MIETTO et al. 2012) weithin ausgeräumt. Und so basieren seit Jahren alle globalen Zeitskalen auf den seit MUNDIL et al. (1996) für die Obergrenze und seit LEHRMANN et al. (2002) für die Untergrenze des Anisiums gewonnenen RIA, die inzwischen weithin akzeptiert werden (Abb. 2).

5.1.1.2 Zyklen in unterschiedlicher Fazies

Wo es keine RIA oder solche nur für einen kurzen Zeitabschnitt gibt wie im Osten der USA im Newark-Becken, sind sedimentäre Zyklen das bevorzugte Mittel zur Zeitabschätzung (OLSEN & KENT 1999). Derzeit basiert die Kalibrierung der globalen Späten Trias zuvorderst auf einer Interpretation der lakustrinen Newark-Zyklen, wobei es in der GTS 2012 die beiden Varianten „Long Tuvalian“ und „Long Rhaetian“ gibt, die sich um bis zu 7 Ma unterscheiden. Ursache für diese Differenz ist die unsichere biostratigraphische Anbindung der kontinentalen Newark-Abfolge an die im marinen Bereich entwickelte GSS und weil in der Newark-Abfolge erhebliche Schichtlücken stecken könnten. Die Darstellung des Keupers in der STD 2016 basiert auf der Variante „Langes Tuvalium“.

Eine orbitale Steuerung der Sedimentation liegt auch nahe in den Südalpen für die lagunären Latemar-Karbonate der Schlern-Formation sowie die hemipelagische Buchenstein-Formation, in der eine etwa 1:5-Relation wie auch eine etwa 1:10-Relation zwischen Zyklen gesehen werden kann. MAURER (2003: 2, 6, 111–113) deutet den 4 cm-Basiszyklus im Seceda-Bohrkern (Buchenstein-Formation) als Präzessionszyklus (≈ 20 ka) und fasst fünf Zyklen davon zu einem Exzentrizitätszyklus (≈ 100 ka) zusammen. Im Unterschied dazu werden hier seine Basiszyklen als Sub-Milankovitch-Zyklen gedeutet. Etwa fünf fallen in einen Präzessionszyklus (≈ 20 ka) und etwa zehn in einen ≈ 40 ka-Zyklus (Schiefe der Ekliptik, Neigung der Erdachse). So entsteht Konsistenz mit den RIA (vgl. Abb. 3a, b, Abschn. 5.1.5, 7.3). Zu betonen ist, dass die ≈ 20 ka- und die ≈ 40 ka-Zyklen klimatisch induziert sein dürften, nicht aber die Sub-Milankovitch-Zyklen. Wegen ihrer unterschiedlichen Ursachen darf deshalb nicht jedem Milankovitch-Zyklus schematisch dieselbe Zahl von Sub-Milankovitch-Zyklen zugeordnet werden.

In den Latemar-Karbonaten gibt es zwischen den Zyklen eine deutlichere 1:5-Relation als in der Buchenstein-Formation. GOLDHAMMER et al. (1987, 1990)

fassen deshalb fünf Latemar-Zyklen, die sie als 20 ka-Zyklen interpretieren, zu einem 100 ka-Zyklus zusammen. Im Unterschied dazu und konsistent mit den RIA sehen ZÜHLKE (2003) und ZÜHLKE et al. (2003a, b) ca. fünf Zyklen, die sie als im Mittel 4,2 ka lange Sub-Milankovitch-Zyklen deuten, zu einem 21 ka-Zyklus (lange Präzession, s. Abschn. 5.1.5) zusammen.

In Karbonat- und Mergelgesteinen gibt es zweifellos Allozyklen wie auch Autozyklen. Deshalb ist die Verwendung von Zyklen für die Kalibrierung regionaler Zeitskalen umstritten, so auch im epikontinentalen Muschelkalk. Um welche Art von Zyklen es sich handelt, muss für jeden Ort und jedes Milieu einzeln abgewogen werden. Ein Merkmal von Allozyklen ist ihr weites laterales Aushalten und dieses ist für einen Teil der Muschelkalkzyklen gesichert (s. Abschn. 5.2). Proxies für sedimentäre Zyklen können die natürliche Gammastrahlung (Gamma-Log, z. B. SZURLIES 2001), die magnetische Suszeptibilität (χ , z. B. ELLWOOD et al. 2011, DE VLEESCHOUWER et al. 2013) und die Grautonanalyse (MAURER 2003) sein.

5.1.1.3 Ausgewählte Mächtigkeiten als Zeitindikation

Mächtigkeiten von Schichten sind unter günstigen geologischen Umständen relevant für die Kalibrierung regionaler Zeitskalen. So sind die zeitlichen Relationen innerhalb des Namuriums, Westfaliums und Stefaniums nicht allein mit RIA, sondern zugleich mit Hilfe von gewichteten mittleren Mächtigkeiten abgeleitet (MENNING et al. 2000).

Auch in der vorliegenden Arbeit werden Mächtigkeiten mitgenutzt, um die Dauer von Unterstufen und Biozonen abzuschätzen. Die Mächtigkeitsrelationen innerhalb der hemipelagischen Buchenstein-Formation scheinen dafür besonders geeignet, denn sie sind über große Entfernungen vergleichbar in Nord-Italien (Seceda, Bagolino) und Ungarn (Felsöör; HAAS & BUDAI 2002) sowie in korrespondierenden Einheiten in den Nördlichen Kalkalpen (Reifling-Formation) und Nevada (Humboldt Range): *The similar proportional thickness of corresponding [hemi]pelagic intervals in sections as far as those illustrated in Fig. 1 suggest that long-term rates of accumulation of [hemi]pelagic sediments were almost linear over long timespans at each place* (BRACK & RIEBER 1994: 34). Die vorgenannten Mächtigkeitsrelationen sprechen für eine annähernde Proportionalität von Mächtigkeit und Zeit und sind deshalb mit den RIA integriert, um die Dauer der Unterstufen und von Biozonen mit Hilfe der „Linienanpassung“ (TUCKER et al. 1998) abzuschätzen (Abb. 3a, b). Dieser Weg liegt geologisch näher als Ableitungen allein auf der Basis von RIA und mathematischen Algorithmen, die viele Nutzer kaum verifizieren können und die zuweilen zu geologisch unplausiblen Ergebnissen führen.

Age TMS 1996	STAGE	Sub-stage	Ammonoid zone	Duration	Latemar unit	Seceda
235	CARNIAN	Cordevolian	<i>Daxatina canadensis</i>	–	BRACK & RIEBER 1993: LCF + MTF + UCF = Curionii zone + Gredleri zone (part)	ZÜHLKE et al. 2003a: 660 cycles à ≈4,2 ka ≈2,8 Ma
236			Longobardian	<i>Frankites regoledanus</i>		
237	LADINIAN	Fassanian		<i>Protrachyceras archelaus</i>	MAURER 2003: 92-64 m = 67 cycles à ≈40 ka ≈2,7 Ma	
238			<i>Protrachyceras gredleri</i>	≈1.1		
239			<i>Eoprotrachyceras curionii</i>	≈1.7		
240	ANISIAN	Illyrian	<i>Nevadites secedensis</i>	≈0.6	Latemar ≈2.8 Ma	Seceda ≈2.7 Ma
241			<i>Reitziites reitzi s.l.</i>	≈1.2		
242			<i>Paraceratites trinodosus</i>	–		
243						

Latemar unit	ZÜHLKE et al. 2003a thickness	basic cycles
Upper Tepee Facies	UTF	75 m
Upper Cyclic Facies	UCF	169 m 226-268
Middle Tepee Facies	MTF	119 m 201-221
Lower Cyclic Facies	LCF	93 m 90-91
Lower Tepee Facies	LTF	20-28 m
Lower Platform Facies	LPF	235-255 m

Anisian-Ladinian boundary ages

- ≈240.7 Ma, MUNDIL et al. 1996-M96 (TMS)
≈240.7 Ma, this work: Fig. 9, 10, 11
- ≈239.5 Ma (multigrain)
PÁLFY et al. 2002/03-P03
- ≈242.5 (≈242) Ma (CA-TIMS)
MUNDIL et al. 2003-M03
Stratigraphy:
BRACK & RIEBER 1993

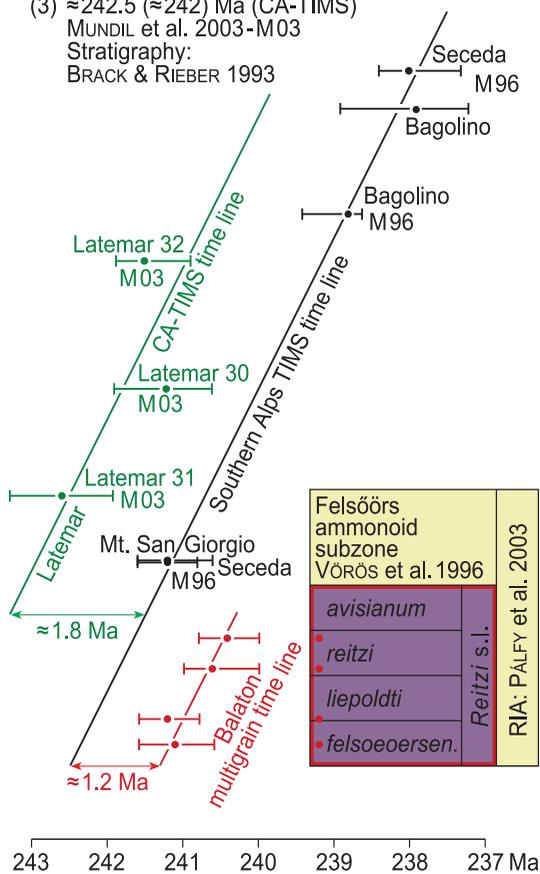


Abb. 3a: Integrierte radio-isotopische Altersbestimmungen (RIA): Multikorn-RIA aus der *R. reitzi*-Zone s. l. und TMS-RIA aus der *N. secedensis*- und *P. gredleri*-Zone sowie die darauf aufbauende Dauer der Ammonitenzonen im späten Anisium und frühen Ladinium. CA-TIMS-RIA aus der Latemar-Abfolge, die in die *E. curionii*- und jüngste *N. secedensis*-Zone eingestuft ist.

(1) Linienanpassung heißt, möglichst viele RIA so zu platzieren, dass sie zentrisch auf einer zu konstruierenden Regressionsgeraden (Zeitstrahl, time line) zu liegen kommen bzw. so, dass ihr Konfidenzbereich diese Gerade schneidet oder zumindest tangiert. (2) Dabei ist die Abszisse die Zeitachse für die RIA. (3) Die Ordinate zeigt die Biozonen und eine zweite Zeitachse. (4) Die vertikale und die horizontale Zeitachse korrespondieren miteinander über die Regressionsgerade (vgl. Abb. 3b, 5: gestrichelte Linien). (5) Aus dem

Alter der RIA und ihrer Lage innerhalb der Biozonen werden die Grenzalter der Biozonen abgeleitet.

Bei der Integration wurde beachtet, dass die RIA aus den Südalpen von Seceda und Bagolino relativ zur Mächtigkeit der beiden Profile nicht auf einer Geraden liegen, sondern auf einer gekrümmten Linie (BRACK et al. 1996: 374). Die Krümmung zeigt, dass die Akkumulationsrate in der Buchenstein-Formation zum Hangenden hin zunimmt und dass hier Mächtigkeiten nicht linear in Zeit transformiert werden dürfen. Mit Hilfe der

Age TMS 1996	STAGE	Sub-stage	Ammonoid zone	Duration	Latemar unit cycles	Seceda
235	CARNIAN	Cordevolian	<i>Daxatina canadensis</i>	-	MUNDIL et al. 2003: UTF with <i>Chieseiceras</i> =Secedensis + <i>Curionii</i> zone, LTF = upper Reitzi zone	MAURER 2003: 92-64 m = 67 cycles à 40 ka ≈ 2.7 Ma
236			Longobardian	<i>Frankites regoledanus</i>		
237	LADINIAN	Longobardian		<i>Protrachyceras archelaus</i>	≈ 1.1	ZÜHLKE et al. 2003a: 660 cycles à 4.2 ka ≈ 2.8 Ma
238			Fassanian	<i>Protrachyceras grecleri</i>	≈ 1.7	
239	Fassanian	<i>Eoprotrachyceras curionii</i>		UTC	Latemar ≈ 2.8 Ma	
240			UCF			
241	ANISIAN	Illirian	<i>Nevadites secedensis</i>	≈ 0.6	MUNDIL et al. 2003: UTF with <i>Chieseiceras</i> =Secedensis + <i>Curionii</i> zone, LTF = upper Reitzi zone	MAURER 2003: 92-64 m = 67 cycles à 40 ka ≈ 2.7 Ma
242			<i>Reitziites reitzi</i> s.l.	≈ 1.2		
243	ANISIAN	Illirian	<i>Paraceratites trinodosus</i>	-	MUNDIL et al. 2003: UTF with <i>Chieseiceras</i> =Secedensis + <i>Curionii</i> zone, LTF = upper Reitzi zone	MAURER 2003: 92-64 m = 67 cycles à 40 ka ≈ 2.7 Ma
241			LTF			
240	MTF					
239	UCF					
238	UTC					
237	UTC					
236	UTC					
235	UTC					

Latemar unit	ZÜHLKE et al. 2003a thickness	basic cycles
Upper Tepee Facies	UTF	75m
Upper Cyclic Facies	UCF	169m
Middle Tepee Facies	MTF	119m
Lower Cyclic Facies	LCF	93m
Lower Tepee Facies	LTF	20-28m
Lower Platform Facies	LPF	235-255m

Anisian-Ladinian boundary ages

- (1) ≈ 240.7 Ma, MUNDIL et al. 1996-M96 (TMS)
- ≈ 240.7 Ma, this work: Fig. 7

- (2) ≈ 242.2 / ≈ 241.8 Ma (CA-TMS)
- acc. MUNDIL et al. 2003-M03, BRACK et al. 2007
- Stratigr.: MUNDIL et al. 2003

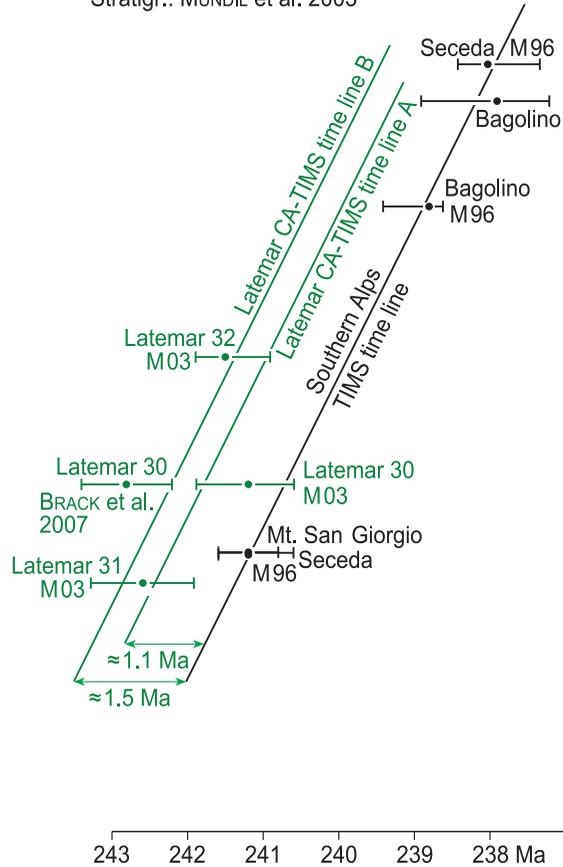


Abb. 3b: Integrierte radio-isotopische Altersbestimmungen (RIA): TMS-RIA aus der *N. secedensis*- und *P. grecleri*-Zone sowie die darauf aufbauende Dauer der Ammonitenzonen im späten Anisium und frühen Ladinium. CA-TMS-RIA aus der Latemar-Abfolge, die hier in die *R. reitzi*-Zone s. l., *E. curionii*-Zone und jüngste *N. secedensis*-Zone eingestuft ist. Der Zeitstrahl A schließt das Latemar 30-Alter von MUNDIL et al. (2003) ein, nicht aber das von BRACK et al. (2007). Der Zeitstrahl B schließt das Latemar 30-Alter von BRACK et al. 2007 ein, nicht aber das von MUNDIL et al. (2003).

Linienanpassung sind die RIA auf die bei dieser Methode übliche Gerade transformiert worden, wobei die Länge der Ammonitenzonen im Vergleich zu ihrer Mächtigkeit zum Hangenden hin verkürzt wurde (Abb. 3a, b).

5.1.2 Anisium

Einführend ist zu den in Abbildungen und Tabellen dargestellten Zonen und Subzonen zu sagen, dass es wegen des Faunenprovinzialismus keine global gültigen

Zonenschemata für Conodonten und Ammoniten gibt. Dargestellt sind vor allem Zonen, die Autoren für ihre RIA angeben und die hier für Korrelationen von Bedeutung sind.

5.1.2.1 Alter und Dauer des Anisiums

Der Beginn der Mittleren Trias bzw. des Anisiums fällt seit LEHRMANN et al. (2002) in das schmale Zeitfenster von 247,5 bis 247 Ma (außer in der GTS 2004)

(Abb. 2). Als Marker für die Untergrenze gilt weithin das erste Erscheinen des Conodonten *Chiosella timorensis*, so auch im südchinesischen Profil Guandao (Guizhou). Dort wurden drei Tuffe aus dem Bereich der Anisium-Basis anhand ihrer Zirkone datiert. Sie zeigen völlig konsistente U-Pb CA-ID-TIMS Alter zwischen 247,4 und 247,1 Ma (LEHRMANN et al. 2006: Fig. 2), aus denen sich nach der Linienanpassung zweifelsfrei ein Alter von 247,2 Ma für die Untergrenze des Anisiums ergibt (Abb. 4).

Die Grenze Olenekium-Anisium ist im Guandao-Profil ein zweites Mal höchst genau mit Hilfe von U-Pb CA-ID-TIMS Altersbestimmungen datiert worden. OVTCHAROVA et al. (2015) errechneten auf der Basis von 14 RIA von unter- und oberhalb der Stufengrenze vier mittlere Grenzalter: (1) Nach der kubischen Spline-Interpolation (cubic spline fitting) $247,17 \pm 0,10$ Ma (Biozonen) und (2) $247,24 \pm 0,07$ Ma (FOD von *Chiosella timorensis*) sowie nach der Bayes-Statistik (3) $247,05 \pm 0,16$ Ma (Biozonen) und (4) $247,302 \pm 0,04$ Ma (FOD). Sie bevorzugen das Alter (3) von $247,05 \pm 0,16$ Ma (Biozonen), das durch jüngere RIA, die außerhalb des Datenschwerpunkts liegen (Abb. 4), und die Anwendung der Bayes-Interpolation hin zu einem jungen Alter gedrückt wird (OVTCHAROVA et al. 2015: Fig. 4, 6).

Die Bayes-Statistik hat Vorteile bei wenigen und sehr ungleich verteilten Datenpunkten. Hier ist sie jedoch entbehrlich, weil die 14 interpolierten RIA gleichmäßig in einem nur 13 m mächtigen Profilschnitt verteilt sind und in das nur 1,57 Ma schmale Zeitfenster ($247,77 \pm 0,06$ Ma bis $246,43 \pm 0,17$ Ma) fallen. Nach der Linienanpassung (vgl. MENNING et al. 2017, Devon) ist das Alter der Olenekium-Anisium-Grenze wie bei LEHRMANN et al. (2006) 247,2 Ma (gerundet auf 0,1 Ma) (Abb. 4).

Die Obergrenze des Anisiums ist hier datiert mit 241,8 Ma, (Abb. 5) mit Hilfe der CA-TIMS-RIA MSG.09 (MUNDIL et al. 2010) und SEC-C (WOTZLAW et al. 2018) in der frühen *N. secedensis*-Zone und der CA-TIMS RIA SEC-D, FEO-12 und SEC-E in der frühen *P. grecleri*-Zone (WOTZLAW et al. 2018) in Kombination mit den in sich konsistenten TIMS-RIA von MUNDIL et al. (1996) und unter Einbeziehung der Mächtigkeitsrelationen in der Buchenstein-Formation (Abschn. 5.1.1.3).

Die CA-TIMS-Alter vom Latemar sind innerhalb der Ammonitenzonen nicht sicher positioniert (im Unterschied zu den TIMS-RIA aus der Buchenstein-Formation). Zudem sind die RIA LAT 30 von MUNDIL

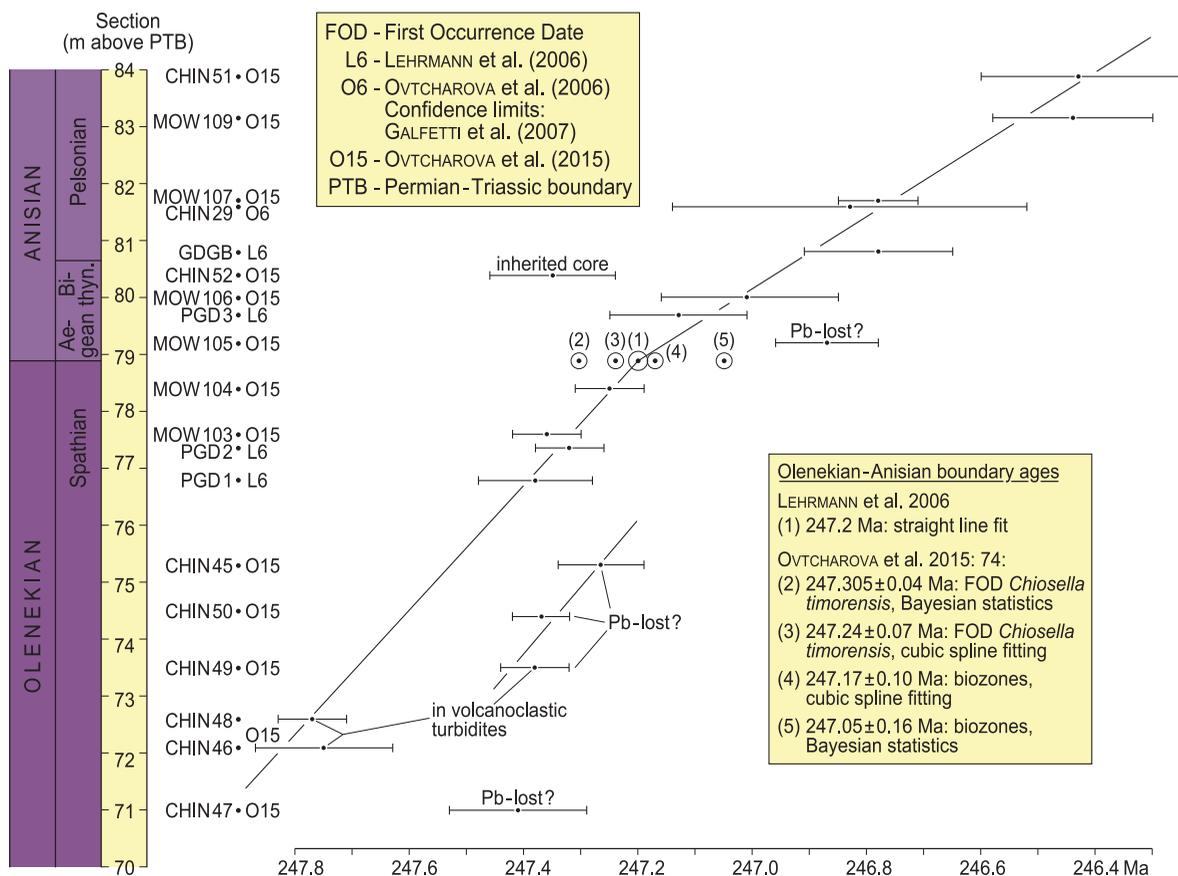


Abb. 4: Numerische Datierung der Grenze Olenekium-Anisium mit Hilfe der U-Pb CA-ID-TIMS Altersbestimmungen von LEHRMANN et al. (2006) und OVTCHAROVA et al. (2015) in Süd-China (Guandao)

et al. (2003) und BRACK et al. (2007) inkonsistent zueinander, weil sich ihre Vertrauensbereiche nicht überlappen; die RIA LAT 30 von BRACK et al. (2007) ist die älteste innerhalb der Latemar-Abfolge überhaupt (Abb. 3b, 5). Deshalb und infolge der erheblichen Variation der Latemar-RIA werden hier verschiedene CA-TIMS-Latemar-Zeitstrahlen abgeleitet. In Relation zum TIMS-Zeitstrahl sind sie älter: z. B. $\approx 1,8$ Ma (Abb. 3a), $\approx 1,5$ Ma und $\approx 1,1$ Ma (Abb. 3b); empfohlen wird nach den RIA aus der Beckenfazies eine Differenz von $\approx 1,1$ Ma (Abb. 5), die im Sinne von BRACK & RIEBER (1993) zur biostratigraphischen Reichweite der Latemar-Karbonate (späte *R. reitzi*-s. l. bis frühe *P. gredleri*-Zone) passt.

Die Multikornpräparate von PÁLFY et al. (2002, 2003) sind um $\approx 1,2$ Ma jünger im Vergleich zu den U-Pb ID-TIMS-Altern von MUNDIL et al. (1996) auf der Basis von einzelnen Körnern. Die Balaton-RIA sind deshalb auf einem eigenen Zeitstrahl dargestellt (Abb. 3a, 5).

Indem jetzt differenzierte Regressionsgeraden und damit Zeitskalen für TIMS-, CA-TIMS- und Multikorn-RIA zur Verfügung stehen (Abb. 3a, b, 5), ist die Ursache für die variable Dauer des Anisiums in publizierten Zeitskalen offensichtlich: Werden die CA-TIMS-Alter von der Basis des Anisiums (LEHRMANN et al. 2006) mit den TIMS-Altern vom Top (MUNDIL et al. 1996) kombiniert, so ist die Anisium-Stufe $\geq 6,4$ Ma lang. Werden jedoch CA-TIMS-Alter von der Basis und vom Top des Anisiums kombiniert, so dauert das Anisium nur 5–5,6 Ma, in der hier abgeleiteten Zeitskala $\approx 5,4$ Ma (247,2–241,8 Ma) (Tab. 3, Abb. 5).

Grund für die leicht inkonsistenten RIA ist die zwischenzeitlich modifizierte Datierungsmethodik, insbesondere die geänderte Vorbehandlung der Zirkonpräparate. Zum einen geben Multikornpräparate nicht zu erkennen, ob einzelne Körner ererbte Kerne haben und zu hohe Alter liefern und/oder ob andere Körner einen Bleiverlust erlitten haben und zu junge Alter ergeben. Dagegen bieten Einzelkorndatierungen die Chance, solche Körner auszusondern und nicht in das mittlere Alter einzurechnen. Außerdem werden nach MATTINSON (2005) die einzelnen Zirkonkörner mit Hilfe von „high temperature annealing“ und „chemical abrasion“ (HF leaching procedure) zusätzlich „gesäubert“. Diese CA-TIMS-Methode führt in der Regel zu systematisch höheren Altern als die TIMS-Altersbestimmung, weil Pb-Verluste oft insbesondere äußere Teile der Zirkonkristalle betreffen, die durch Abrasion entfernt oder spürbar reduziert werden.

5.1.2.2 Dauer der Unterstufen des Anisiums

Die Unterstufen Aegaeum und Bithynium dauern nach der RIA GDGB-110 mit dem Alter von 246,8

Ma $+0,4/-0,5$ Ma (LEHRMANN et al. 2006) aus dem frühesten Pelsonium zusammen maximal 0,8 Ma. Diese RIA ist gemeinsam mit dem Alter von 247,2 Ma für die Olenekium-Anisium-Grenze (LEHRMANN et al. 2002, 2006, OVTCHAROVA et al. 2015) ausschlaggebend für diese sehr kurz erscheinende Zeitspanne, die mit den meisten bisher erschienenen Zeitskalen und den Mächtigkeitsrelationen in Spiti (Indien, KRYSSTYN et al. 2004) kontrastiert. Ohne Ausschöpfung des Vertrauensbereichs von $-0,5$ Ma wären beide Unterstufen noch kürzer (Abb. 5). Einerseits bezweifeln KOZUR & WEEMS (2010: 329) die biostratigraphische Einstufung der RIA in das früheste Pelsonium und geben 1,0 Ma für das Aegaeum und 1,1 Ma für das Bithynium an. Auch L. Krystyn (schriftl. Mitt. 2.5.2019) platziert die RIA GDGB Tuff-110 „ganz sicher im unteren Bithynium“. Doch andererseits ist die Datenqualität der RIA GDGB Tuff-110 (LEHRMANN et al. 2006: Fig. 2) ausgezeichnet (schriftl. Mitt. J. Glodny 28.6.2019). Zudem harmonisiert diese RIA mit der Zeitspanne von $\approx 0,8$ Ma für das Aegaeum und Bithynium entsprechend der zylostratigraphischen Kalibrierung der Folge s7 (vgl. Abschn. 6, 7, Abb. 7, 8, 9, 10). Sollte die RIA jedoch nicht in das früheste Pelsonium, sondern in das frühe Bithynium gehören, wären die leicht diachronen Korrelationslinien 12 und 16 in Abb. 8 und die Linien 12, 15 und 16 in Abb. 9 nahezu isochron. Dann wäre der Zusammenhang zwischen der beginnenden Muschelkalk- und der Prezzo-Transgression wohl noch augenscheinlicher als bereits jetzt (Abschn. 7.1).

Direkt um die Grenzen der informellen anisischen Unterstufen herum gibt es nur wenige RIA. Deshalb werden hier die zeitlichen Relationen der vier Unterstufen auch mit Hilfe des Profils „upper Guandao“ grob abgeschätzt, indem die Mächtigkeiten annähernd linear in Zeit transformiert werden („graphische Korrelation“ auf der Basis von LEHRMANN et al. 2005: Fig. 14), wobei die brekziösen Bereiche wegen ihrer extrem kurzen Akkumulationszeit nicht in die Transformation eingehen): Aegaeum und Bithynium sind danach sehr kurz und Pelsonium und Illyrium sind um ein Vielfaches länger. Pelsonium und Illyrium haben in Guandao nach ihren Mächtigkeiten (ohne Brekzien) etwa ein Verhältnis von 5:3. Im Unterschied dazu wird aber das Illyrium meistens länger als das Pelsonium abgeschätzt. Mehrfach wurden ihm ca. 50% der Zeit des Anisiums zugeschrieben (Tab. 3). Dies wird gestützt von einer RIA von $244,6 \pm 0,5$ Ma in der *Balatonites shoshonensis*-Zone (OVTCHAROVA et al. 2006; Abb. 5). Mit ca. 2,7 Ma ist das Illyrium wohl die längste Unterstufe der Mittleren Trias, in die bis zu 20% der Zeit des Unteren Muschelkalks (Kap. 6.1: 50% bis 75% des Zyklus MU4), der Mittlere Muschelkalk und knapp zwei Drittel des Oberen Muschelkalks gehören (vgl. Abb. 8). Auf das Pelso-

nium entfallen ca. 1,9 Ma (Abb. 5). Somit haben die Unterstufen des Anisiums höchst variable Längen zwischen ca. 0,4 und ca. 2,7 Ma, was auch in der STD 2002 und STD 2016 generalisiert dargestellt ist.

Autoren / Stufen, Unterstufen	IND	Grie	Die	OL	Smi	Spa	ANI	Aeg	Bith	Pel	Illyr	LA	Fas	Lan
GTS 1964				10								10		
AFANASYEV & ZYKOV 1975				15								10		
VAN EYSINGA 1975				7								11		
VAN HINTE 1976				5			5	-	-	-	-	10	-	-
ARMSTRONG 1978				6			4	-	-	-	-	3,5	-	-
SHELL 1980				6			6	-	-	-	-	5	-	-
ODIN 1982				6			6	-	-	-	-	4	-	-
GTS 1982				5			5	-	-	-	-	7	-	-
PALMER 1983				5			5	-	-	-	-	5	-	-
SALVADOR 1985				5			5	-	-	-	-	10	-	-
HAQ et al 1988	5,3	-	-	4,7			4	-	-	-	-	5	-	-
MENNING 1989: Fig. 1, 1990				7			6	-	-	-	-	5	-	-
GTS 1989				3,9			1,6	-	-	-	-	4,5	-	-
BRACK & RIEBER 1993: Fig. 13				-			-	-	-	-	3,3	7,0	(4,4)	(2,6)
ODIN 1994				10			7	-	-	-	-	3	-	-
GRADSTEIN et al. 1994: Fig. 9	3,4	1,9	1,5	3,1	1,5	1,6	9,2	2,4	1,8	1,4	3,6	5,1	2,2	2,9
MENNING 1995: Fig. 1	6	-	-	4	-	-	7	-	-	-	-	5	-	-
BRACK et al. 1996: Fig. 5 (<i>R. reitzi</i> s. str.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-
BRACK et al. 1996: Fig. 5 (<i>E. curionii</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,9	-
GRADSTEIN & OGG 1996	3,4	-	-	3,1	-	-	7,4	-	-	-	-	6,9	-	-
KENT & OLSEN 2000				7			2	-	-	-	-	8	-	-
HAAS & BUDAI 2002: Fig. 3	3,4	1,9	1,5	3,1	1,5	1,6	7,4	2,4	1,8	1,2	2,0	6,9	2,9	4,0
STD 2002	2,0	-	-	5	-	-	6	-	-	-	-	7	-	-
PÁLFY et al. 2003: 281	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,5 ²	-	-
MUNDIL et al. 2003: Fig. 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,5	-
LUCAS 2003: Fig. 2	1,8	-	-	2,2	-	-	7	-	-	-	-	3	-	-
KOZUR 2003a, b; KOZUR & BACHMANN 2003a, b	1,9	-	-	3,7	-	-	7,5	-	-	-	-	2,5	-	-
BACHMANN & KOZUR 2004, KOZUR & B. 2005	1,6	1,0	0,6	4	2,0	2,0	6,5	0,8	1,2	1,2	3,3	3,5	1,5	2,0
MUTTONI et al. 2004: Fig. 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,7	2,6	3,1
GTS 2004	1,3	0,9	-	4,7	-	-	8,0	0,9		2,1	5,0	9,0	3,9	5,1
EMMERICH et al. 2005: Fig. 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,3	-	2,7	-
BRACK et al. 2005: Fig. 9	1	-	-	3,5	-	-	7	-	-	-	-	6	-	-
MENNING et al. 2005: Taf. IX, S. 174	1,5	-	-	3,6	-	-	6,4	-	-	-	-	4,0	-	-
OVTCHAROVA et al. 2006: 472				≥ 4,5 ± 0,6								6,6 +0,7/-0,9	-	-
LEHRMANN et al. 2006: 1055				≥ 5			-	-	-	-	-	-	-	-
BRACK et al. 2007: Fig. 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,2	5,7	2,7	3,0
GALFETTI et al. 2007: 593	1,4 ± 0,4	-	-	-	0,7 ± 0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SZURLIES 2007: 617	1,5	-	-	3,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GTS 2008	1,5	-	-	3,6	-	-	8,9	0,8	2,2	1,8	4,1	8,3	5,3	3,0
KOZUR & BACHMANN 2008; KOZUR & WEEMS 2010	1,8	0,8	1,0	3,6	1,1	2,5	6,7	1,0	1,1	1,3	3,3	3,5	1,5	2,0
MUNDIL et al. 2010: 41	1,1	-	-	4,0	-	-	5,2	-	-	-	-	-	-	-
LUCAS 2013: Fig. 2	1	0,5	0,5	4	2	2	5	-	-	-	-	5	-	-
MENNING & KADING 2013: Abb. 6.7.4	1,5	-	-	4,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GTS 2012 (Fig. 25.5, 25.7)	2,2	1,3	0,9	2,9	1,5	1,4	5,6	0,7	0,7	0,8	3,4	4,5	2,4	2,1
GTS 2016 (Fig. 11.1)	2,1	1,2	0,9	3,0	1,6	1,4	5,3	1,8	0,7	0,8	2,0	3,5	2,4	2,1
STD 2016	1,5	-	-	3,5	-	-	6,5	-	-	-	-	6	-	-
ICS 2018/8	1,0; 0,7			4,0	-	-	5,2	-	-	-	-	5	-	-
WOTZLAW et al. 2018: Fig. 1c, Table 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,2	4,4	2,5	1,9
MENNING 2019, diese Arbeit	1,5	-	-	3,8	-	-	5,4	0,4	0,4	1,9	2,7	4,8	2,5	2,3
Autoren / Stufen, Unterstufen	IND	Grie	Die	OL	Smi	Spa	ANI	Aeg	Bith	Pel	Illyr	LA	Fas	Lan

(1) Die Dauer der Einheiten sind Näherungswerte (≈).

(2) *In kursiv: traditionelle Anisium-Ladinium-Grenze (Basis der Buchenstein-Formation, ≈ Basis der Reitziites reitzi-Zone s. str.)*

(3) **IND = INDUSIUM**, Grie = Griesbachium, Die = Dienerium, **OL = OLENEKIUM**, Smi = Smithium, Spa = Spathium, **ANI = ANISIUM**, Aeg = Aegaeum, Bith = Bithynium, Pel = Pelsonium, Illyr = Illyrium, **LA = LADINIUM**, Fas = Fassinium, Lan = Langobardium

Tab. 3: Dauer der Stufen und Unterstufen der Frühen und Mittleren Trias 1964–2019

Hinsichtlich der Relation von Anisium und Ladinium sei vorangestellt, dass das traditionelle untere Fassanium infolge der Definition des GSSP für das Ladinium mit dem FOD des Ammoniten *Eoprotrachyceras curionii* in Bagolino (BRACK et al. 2005) aus dem Ladinium in das Anisium umgestuft wurde. Damit wurde das Illyrium wesentlich länger und das im Ladinium verbleibende Fassanium sehr viel kürzer. In das Illyrium gehören seit der GSSP-Entscheidung die drei Ammonitenzonen *Paraceratites trinodosus*, *Reitziites reitzi* s. l. (VÖRÖS et al. 1996 = *reitzi*-Zone) und *Nevadites secedensis*, während zuvor die Zonen *R. reitzi* s. str. und *N. secedensis* zum Fassanium gerechnet wurden.

5.1.2.3 Dauer der Faunenzonen im Anisium

Die *R. reitzi*-Zone s. l. könnte nach den U-Pb ID-TIMS-Altern von PÁLFY et al. (2003) eine Dauer von ca. 1,2 Ma (Fig. 3a, 5) haben: Vier RIA zeigen in sich konsistente Alter zwischen $241,1 \pm 0,5$ Ma und $240,5 \pm 0,5$ Ma. Sie stammen aus den Subzonen *felsoeoerensis*, *liepoldti* und *reitzi*, die in Ungarn (Bakony-Oberland) zusammen mit der jüngeren *avisianum*-Subzone die *R. reitzi*-Zone (s. l.) bilden (VÖRÖS et al. 2002: Fig. 1/3). Den vier Subzonen wird hier spekulativ dieselbe Dauer zugeordnet entsprechend der vergleichbaren Zahl ihrer Karbonathorizonte innerhalb der mächtigen vulkanischen Aschen des Profils Felsöör (PÁLFY et al. 2003; Abb. 5). Es sind keine lithologisch homogenen Profile mit der vollständigen *R. reitzi*-Zone bekannt, deren Mächtigkeiten in Zeit transformiert werden könnten.

Der *N. secedensis*-Zone werden zwischen $\approx 0,85$ Ma (BRACK & RIEBER 1993: Fig. 13) und $0,35$ Ma (WOTZLAW

Autoren	Region, Gebiet Lithostratigraphie	Ammonoideen-Zone	Alter Dauer	
BRACK & RIEBER 1993: Fig. 13	Südalpen bezogen auf das Referenzprofil Bagolino: Esino-Kalkstein Wengen-Formation Buchenstein-Formation Übergangsschichten Prezzo-Kalkstein	Top <i>F. regoledanus</i> -Zone	≈ 225 Ma	
		<i>F. regoledanus</i> -Zone	$\approx 1,5$	
		<i>P. archelaus</i> -Zone	$\approx 1,1$	
		<i>P. gredleri</i> -Zone	$(\approx 3,1)$	
		<i>E. curionii</i> -Zone	$\approx 1,3$	
		<i>N. secedensis</i> -Zone	$\approx 0,85$	
		<i>R. reitzi</i> -Zone	$\approx 1,45$	
BRACK et al. 1996: Fig. 5	Südalpen, Buchenstein-Formation	<i>P. gredleri</i> -Zone	$\approx 1,4$	
		<i>E. curionii</i> -Zone	$\approx 1,5$	
		<i>N. secedensis</i> -Zone	$\approx 0,7$	
		<i>R. reitzi</i> -Zone	$\approx 1,4$	
PÁLFY et al. 2003: 281	Forrás (Felsöör), Vászoly-Fm. (Ungarn)	<i>R. reitzi</i> -Zone	$< 1,2$ Ma	
PÁLFY et al. 2003: 282		mittlere Dauer der 6 Zonen <i>R. reitzi</i> bis <i>F. regoledanus</i>	$\approx 0,75$	
MUNDIL et al. 2003: Fig. 2	Südalpen, Buchenstein-Formation	<i>P. archelaus</i> -Zone	$\approx 0,35$	
		<i>P. gredleri</i> -Zone	$\approx 1,05$	
		<i>E. curionii</i> -Zone	$\approx 1,45$	
		<i>N. secedensis</i> -Zone	$\approx 0,75$	
MUTTONI et al. 2004: Fig. 7, p. 101	Südalpen, hauptsächlich Buchenstein-Formation	Basis <i>P. archelaus</i> -Zone	$\approx 238,1$ Ma	
		<i>P. archelaus</i> - + <i>F. regoledanus</i> -Z.	$\approx 3,10$ Ma	
		Basis <i>P. gredleri</i> -B. <i>P. archelaus</i>	$\approx 1,15$ Ma	
		Basis <i>E. curionii</i> -Basis <i>P. gredleri</i>	$\approx 1,45$ Ma	
		<i>N. secedensis</i> -Zone	$\approx 0,75$ Ma	
EMMERICH et al. 2005: Fig. 4	Südalpen	<i>P. archelaus</i> -Zone	$\approx 0,9$	
		<i>P. gredleri</i> -Zone	$\approx 0,8$	
		<i>E. curionii</i> -Zone	$\approx 2,0$	
		<i>N. secedensis</i> -Zone	$\approx 1,3$	
		<i>R. reitzi</i> -Zone	$\approx 1,3$	
		<i>P. trinodosus</i> -Zone	$\approx 1,7$	
WOTZLAW et al. 2018: Table 2	Südalpen, Buchenstein-Formation bezogen auf das Profil 'Seceda ohne Tuffe'	Basis <i>P. archelaus</i> -Zone	239,0 Ma	
		Basis <i>P. gredleri</i> -B. <i>P. archelaus</i>	1,64 Ma	
		Basis <i>E. curionii</i> -Basis <i>P. gredleri</i>	0,76 Ma	
		Basis <i>N. secedensis</i> -B. <i>E. curionii</i>	0,35 Ma	
		15 Ceratitenzonen	$\approx 3,8$ Ma	
HAGDORN 2019, Kap. 4.2	Germanische Trias Oberer Muschelkalk	mittlere Dauer	$\approx 0,25$ Ma	
MENNING 2019, diese Arbeit	Alpen, Ungarn (Balaton Hochland)	<i>P. archelaus</i> - + <i>F. regoledanus</i> -Z.	$\geq 2,2$ Ma	
		<i>P. gredleri</i> -Zone	$\approx 1,5$ Ma	
		<i>E. curionii</i> -Zone	$\approx 1,1$ Ma	
		<i>N. secedensis</i> -Zone	$\approx 0,6$ Ma	
		<i>R. reitzi</i> -Zone	$\approx 1,2$ Ma	
		<i>P. trinodosus</i> -Zone	$\approx 0,9$ Ma	
		Germanische Trias Oberer Muschelkalk	(1) 15 Ceratitenzonen	$\approx 2,3$ Ma
			(1) mittlere Dauer	$\approx 0,15$ Ma
			(2) 15 Ceratitenzonen	$\approx 1,1$ Ma
			(2) mittlere Dauer	$\approx 0,075$ Ma

(1) 5,75 Zyklen (NITSCH et al. 2019, Kap. 6.1) à 400 ka, (2) 11 Zyklen à 100 ka (KÄDING, schriftl. Mitt. 2015)

Tab. 4: Dauer von Ammonitenzonen im Anisium und Ladinium der westlichen Tethys und im Oberen Muschelkalk Mitteleuropas

et al. 2018: Table 2, STORCK et al. 2019: Fig. 1c) zugemessen (Tab. 4). Sie dürfte etwa $0,60$ Ma lang sein; dafür sprechen: (1) das TIMS-Alter von $241,4 +0,8/-0,6$ Ma nahe der Basis der Zone, (2) das TIMS-Alters von $240,7$ Ma für die Anisium-Ladinium-Grenze (MUNDIL et al. 1996), (3) die relativ geringen Mächtigkeiten im Balaton-Oberland (VÖRÖS et al. 2002: Fig. 1/3), (4) in Seceda (MAURER 2003: Fig. 5.2) und (5) in Bagolino (MIETTO et al. 2003, BRACK et al. 2005) sowie (6) die Mächtigkeitsrelation zwischen der *N. secedensis*- und der *R. reitzi*-Zone.

Eine Zeitrelation von *R. reitzi*- und *N. secedensis*-Zone von 2 zu 1 entspricht der Mächtigkeitsrelation im Bagolino-Profil (BRACK et al. 2005: Figs. 6–8), während

sie im Seceda-Bohrkern 3 zu 1 ist (MAURER 2003: 78). Damit dürfte die Dauer der *N. secedensis*-Zone hier mit 0,6 Ma eher zu hoch als zu niedrig angesetzt sein. Angaben zur Dauer der Zonen *P. trinodosus* und *S. binodosus* sind nicht bekannt. In Abb. 5 sind ihnen spekulativ 0,7 Ma bzw. 0,3 Ma zugeordnet aus-

gehend von der CA-TIMS-RIA von 244,6 Ma in der *B. shoshonensis*-Zone (OVTCHAROVA et al. 2006) und den Multikorn-RIA von 241,1 und 241,2 Ma aus der frühen *R. reitzi* s. l.-Zone (PÁLFY et al. 2003). Die Relation der beiden Zonen ist anhand von Mächtigkeiten noch abzuschätzen.

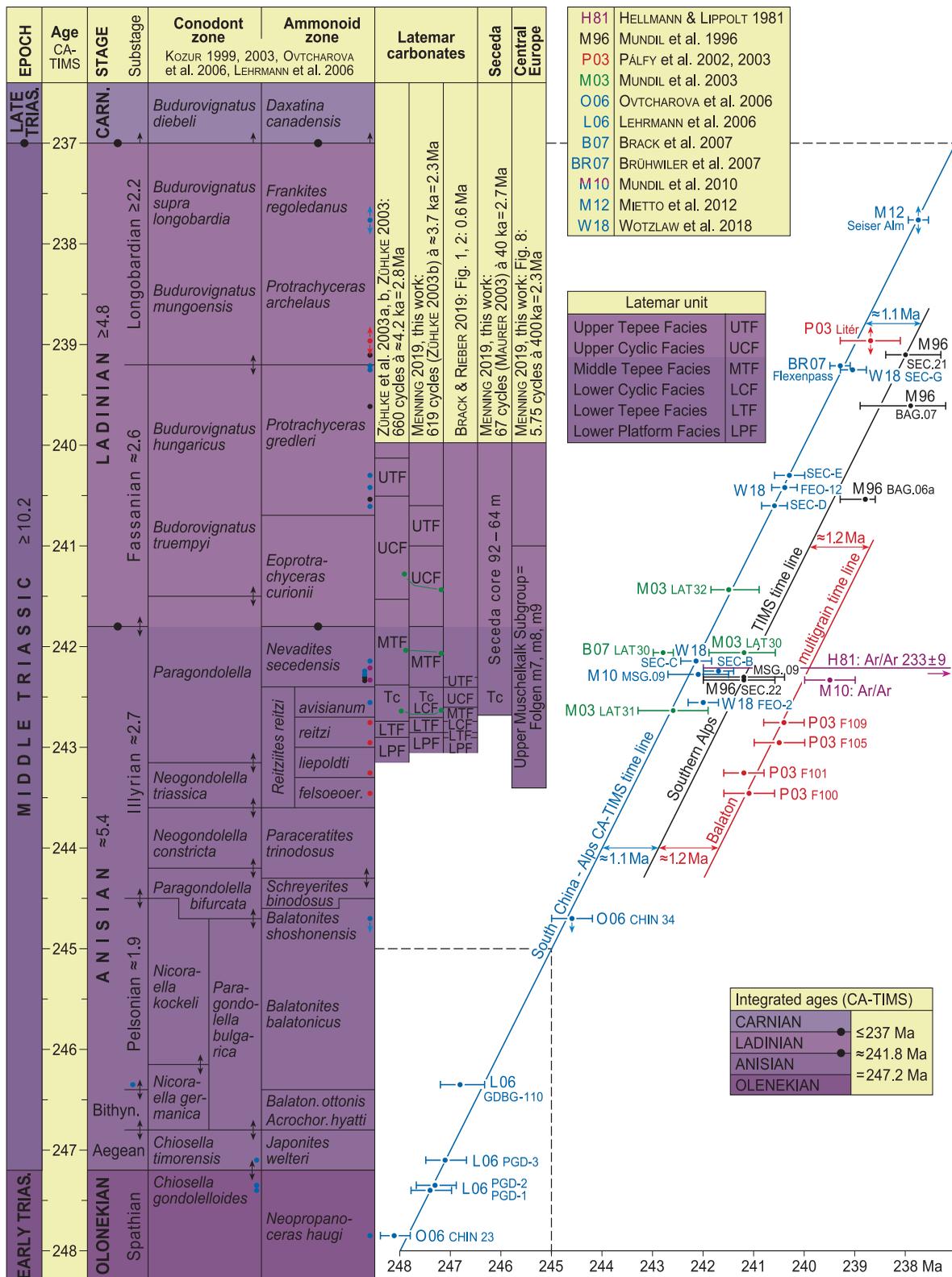


Abb. 5: Numerische Kalibrierung der Mittleren Trias (Anisium, Ladinium) mit Hilfe der Linienanpassung

5.1.3 Ladinium

5.1.3.1 Anisium–Ladinium–Grenze

Mit der Wahl des Ammoniten *Eoprotrachyceras curionii* zum Indexfossil für die GSSP-Basis der Ladinium-Stufe wurde ein erheblicher Teil des herkömmlichen Ladiniums in das Anisium umgestuft. Dies betrifft am GSSP in Bagolino zwar nur knapp 7 m der hemipelagischen Buchenstein-Formation (BRACK et al. 2005), doch darin stecken $\geq 1,2$ Ma, nämlich die *R. reitzi*-Zone s. str. und die *N. secedensis*-Zone (Abb. 3a, b, 5). Einerseits ist eine so drastische Grenzänderung zwischen gut eingeführten Einheiten aus Prioritätsgründen sehr bedauerlich, andererseits hat sie, pragmatisch betrachtet, bewirkt, dass die neue GSSP-Anisium-Ladinium-Grenze mit der in Nordamerika weithin akzeptierten nahezu korrespondiert (BRACK & RIEBER 1993: 459).

Das numerische Alter der Anisium-Ladinium-Grenze ist mangels RIA nahe der Grenze nicht sicher abzuleiten. Deshalb werden dafür die Mächtigkeiten der Ammonitenzonen in der Buchenstein-Formation hinzugezogen und hier in Zeit transformiert entsprechend der Nettoakkumulationsrate, die zum Hangenden hin zunimmt. Bei Transformation der gekrümmten Linie der Nettoakkumulationsrate für Bagolino und Seceda (BRACK et al. 1996: Fig. 5) in eine Gerade ist die Dauer der *N. secedensis*-Zone $\approx 0,6$ Ma und damit länger als nach den reinen Mächtigkeiten.

Derart abgeleitet hat die Ladinium-Basis auf dem TIMS-Zeitstrahl ein Alter von ca. 240,7 Ma (Abb. 5, 7). Es basiert auf TIMS-RIA in der frühen *N. secedensis*-Zone von Seceda in den Dolomiten und dem Monte San Giorgio im Tessin sowie einer RIA in der frühen *P. gredleri*-Zone (MUNDIL et al. 1996), die als Basisalter ebenfalls 240,7 Ma angeben (Abb. 2).

Nach dem um ca. 1,1 Ma älteren CA-TIMS-Zeitstrahl hat die Anisium-Ladinium-Grenze ein Alter von 241,8 Ma, wobei die Alter der RIA in der frühen *N. secedensis*-Zone erheblich variieren (vgl. Abschn. 7.2, 7.3), während drei RIA in der frühen *P. gredleri*-Zone eng beieinander und auf dem Zeitstrahl liegen (Abb. 5). Ein entsprechendes Alter ergibt sich aus den Kleinzyklen in Kap. 6.1, wenn man ihnen wie hier je 400 ka zuschreibt (vgl. Abschn. 6, Abb. 8).

5.1.3.2 Ladinium Obergrenze

Das vielfach angegebene Alter von ca. 237 Ma für die Ladinium-Karnium-Grenze basiert auf dem $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ CA-TIMS-Alter von $237,77 \pm 0,14$ Ma aus der Fernazza-Formation (spätes Ladinium) aus dem Gebiet der Seiser Alm nahe des GSSP für die Karnium-Stufe (MIETTO et al. 2012). Die genaue Position dieser RIA innerhalb des Longobardiums | Lango-

bardiums ist nicht bekannt. Oberhalb der RIA folgen noch etliche Meter der Fernazza-Formation (MIETTO et al. 2012: Fig. 9) und darüber ca. 300 m Wengen-Formation (Ladinium, MIETTO et al. 2012: Fig. 6), so dass das Alter der Ladinium-Karnium-Grenze nach MIETTO et al. (2012: 424–425) nur durch Extrapolation bestimmt werden kann.

Das hier angegebene und ebenfalls nicht sehr zuverlässige integrative Grenzalter ist gleichfalls ca. 237,0 Ma (vgl. Abschn. 6). Es basiert auf der vorstehenden RIA, der Zuordnung von 400 ka zu den Kleinzyklen von NITSCH et al. (2005: Tab. 3: max. 10 Zyklen im k2); NITSCH (2018: 190) und Kap. 6.1 (4 Zyklen im k1) und der palynostratigraphischen Korrelation von SCHULZ & HEUNISCH (2005), wonach der Engelhofen-Horizont der Grabfeld-Formation in das früheste Karnium gehört (Abb. 7).

5.1.3.3 Dauer der Unterstufen und Faunen zonen des Ladiniums

Grundlage für die Zeitabschätzungen innerhalb des Ladiniums bilden CA-TIMS-RIA (drei aus der frühen *P. gredleri*-Zone, zwei aus dem Grenzbereich *P. gredleri*/*P. archelaus*-Zone und eine aus der *F. regoledanus*-Zone), drei TIMS-RIA (Abb. 5) sowie die Zyklen im Muschelkalk und Keuper, denen je 400 ka zugeschrieben werden (Abb. 8). Der CA-TIMS-Zeitstrahl ist gesichert: Alle CA-TIMS-RIA liegen nahezu mittig auf ihm. Dazu kommen die diskutierten CA-TIMS-Alter von $\approx 241,8$ Ma für die Untergrenze und von ≈ 237 Ma für die Obergrenze der Stufe (Abb. 5).

Die Ammonitenzonen haben folgende Dauer: *E. curionii*-Zone ca. 1,1 Ma (s. Abschn. 5.1.2), *P. gredleri*-Zone ca. 1,5 Ma (aufgrund der RIA kaum Spielraum für Änderungen), *P. archelaus*/*F. regoledanus*-Zone $\geq 2,2$ Ma. Demzufolge dauert das GSSP-Fassanium ca. 2,6 Ma und das Longobardium | Langobardium $\geq 2,2$ Ma (Abb. 5).

Nach den TIMS-RIA von MUNDIL et al. (1996) ist das Alter der Untergrenze des Longobardiums | Langobardiums $\approx 238,0$ Ma (Abb. 5, vgl. Abb. 7). Das Alter seiner Obergrenze, und damit des Ladiniums, wurde in der STD 2016 auf Basis der TIMS-RIA mit 235 Ma so jung wie möglich angesetzt. Ziel dabei war es, die für ein relativ langes Longobardium | Langobardium sprechenden geologischen Zeitindikationen zur Wirkung zu bringen und die als überlang empfundene Späte Trias so kurz wie möglich zu halten: (1) Im Longobardium | Langobardium von Süddeutschland und Bulgarien gibt es eine differenzierte Folge von Palyno-Phasen und -Subphasen. (2) Die folgenden drei Unterstufen Cordevolium, Julium und Tualium des Karniums bestehen dagegen bisher nur aus je

einer Palyno-Phase ohne Unterphasen (PETRUNOVA 2002), obwohl das Karnium in der GTS 2012 in der Version langes Rhaetium 7 Ma und in der Version langes Tuvalium sogar 14 Ma dauert. (3) BRACK & RIEBER (1993: 458) argumentieren: *More homogeneous sedimentary successions in other areas suggest that the duration of the younger two Ladinian ammonoid zones [P. archelaus- und F. regoledanus-Zone = Longobardium | Langobardium] is in the same order of magnitude as the older ones [E. curionii- und P. gredleri-Zone = Fassanium].* (4) IKEDA & TADA (2014) schätzen das Alter der Ladinium-Karnium-Grenze zyклоstratigraphisch auf $235,2 \pm 0,9$ Ma ab.

5.1.4 Alternative Zeitskalen: TIMS vs. CA-TIMS

In der Trias gibt es drei Gruppen von RIA, die leicht differierende Zeitskalen ergeben: (1) RIA von Multikornpräparaten haben die jüngsten Alter (PÁLFY et al. 2003). (2) TIMS-RIA anhand einzeln datierter Zirkonkörner ergeben mittlere Alter (MUNDIL et al. 1996) und (3) aus CA-TIMS-RIA resultieren die ältesten Alter (MUNDIL et al. 2003, 2010, LEHRMANN et al. 2006, BRACK et al. 2007, BRÜHWILER et al. 2007, MIETTO et al. 2012, OVTCHAROVA et al. 2015, WOTZLAW et al. 2018, STORCK et al. 2019; Abb. 5). Deshalb werden hier eine TIMS-, eine CA-TIMS- und eine Multikorn-Zeitskala vorgestellt und integriert (Abschn. 6). Dadurch wird erreicht, dass die Dauer stratigraphischer Einheiten besser abgeschätzt ist als mit einer gleichrangigen Mischung untereinander leicht inkonsistenter RIA (Abschn. 5) und dass in einer Zeitskala nicht gestreckte und gestauchte Teilstücke abwechseln, denn es gibt bisher für einzelne Zeitabschnitte nur bzw. vor allem Multikorn-RIA oder TIMS-RIA oder CA-TIMS-RIA (Abb. 5).

5.1.5 Sedimentäre Zyklen: Seceda und die Latemar-Kontroverse

Vielfältige stratigraphische Untersuchungen der Profile Latemar und Seceda in den Dolomiten haben mehrheitlich inkonsistente Ergebnisse geliefert und infolgedessen variable Interpretationen nach sich gezogen, die bis heute kontrovers diskutiert werden. Hier wird auf sie eingegangen, weil die Daten aus Südtirol direkten Einfluss auf die Geochronometrie des Muschelkalks in Mitteleuropa haben, weil eine plausible Lösung des Problems angeboten werden kann und weil Zweifel an der orbitalen Natur vieler Zyklen in der Buchenstein-Formation, in den Latemar-Karbonaten und damit letztlich auch im Muschelkalk so weit wie möglich ausgeräumt werden sollen.

Seceda – Der Seceda-Bohrkern und der Seceda-Tagesaufschluss am westlichen Ende der Geissler-Gruppe sind biostratigraphisch genau datiert, lithostratigraphisch bestens korreliert und zyклоstratigraphisch

mehrfach analysiert worden. Trotzdem existiert noch kein befriedigendes Modell, denn die Gammamessungen und Grauton-Scans ergaben unterschiedliche Zyklenzahlen (MAURER 2003: 2, 112–113) und deren Interpretation ist nicht konsistent mit den RIA von MUNDIL et al. (1996).

Die kleinsten Zyklen sind im Mittel 4 cm mächtig (*smallest variations visible*, MAURER 2003: 111) und haben eine Sub-Milankovitch-Dauer, also keine orbital-klimatische Genese. Es stimme aber nach MAURER (2003: 97) hoffnungsvoll, dass im bereinigten Kernintervall (92–64 m) 2 Pi Multitaper-Analyse, Amplitudenspektrogramm und gefilterte Signale das Vorhandensein von Milankovitch-Zyklen nahelegen.

Entscheidend bei der Spektralanalyse ist die zeitliche Relation der Peaks untereinander, aus der sich die Zuordnung der Peaks zu einer bestimmten Milankovitch-Frequenz ergibt. Das Resultat muss mit den RIA konsistent sein.

- Die Relation von 1:2 entspricht der Präzession (≈ 20 ka) zur Erdneigung (≈ 40 ka).
- Die Relation 1:2,5 spricht für Erdneigung (≈ 40 ka) zu kurzer Exzentrizität (≈ 100 ka).
- Die Relation 1:4 steht für kurze Exzentrizität (≈ 100 ka) zu langer Exzentrizität (≈ 400 ka).
- Die Relation 1:5 spricht für Präzession (≈ 20 ka) zu kurzer Exzentrizität (≈ 100 ka).
- Die Relation 1:10 entspricht der Erdneigung (≈ 40 ka) zur langen Exzentrizität (≈ 400 ka).
- Die Relation 1:20 steht für Präzession (≈ 20 ka) zu langer Exzentrizität (≈ 400 ka).

Die Daten des Seceda-Bohrkerns werden bei Interpretation des für die Zyклоstratigraphie geeignetsten Teils 92–64 m Tiefe hier wie folgt konsistent verbunden: Den 67 Zyklen (MAURER 2003) wird eine Dauer von je ≈ 40 ka (Erdneigung) zugeschrieben. Die resultierende Dauer von ca. 2,7 Ma ist konsistent mit den RIA der Mittleren Trias (Abb. 5). Bei einer Zyklendauer von ≈ 36 ka (BERGER & LOUTRE 1994) stecken im Teufenbereich 92–64 m $\approx 2,5$ Ma. Beide Längen passen zu den RIA, denn die RIA von MUNDIL et al. (1996) aus den Buchenstein-Schichten in Seceda (frühe *N. secedensis*-Zone, $241,2 \pm 0,8/-0,6$ Ma) und von Bagolino (späte *P. gredleri*-Zone, $238,8 \pm 0,5/-0,2$ Ma) – beide Profile sind bio- und tephrostratigraphisch präzise korreliert – ergeben eine Zeitspanne von ca. 2,4 Ma für den zwischen diesen RIA liegenden Teil des Seceda-Bohrkerns. Bei Berücksichtigung der RIA-Vertrauensbereiche ist die maximale Zeitspanne 3,4 Ma und die minimale 1,3 Ma.

Andererseits dauerte die Sedimentation nach den Grauton-Scans mit 5,8 Ma (MAURER 2003) signifikant länger. Deshalb weist MAURER (2003: 112) den 40 cm-Zyklus in der Hintergrundsedimentation (ohne

Kalziturbidite und Tuffe, 21 m mächtig der kurzen Exzentrizität (≈ 100 ka) zu und eine kürzere Zyklizität von 8 cm der Präzession (≈ 20 ka).

Auch WOTZLAW et al. (2018: Fig. 6, Table 1) kommen zu einer Zyklendauer von $18,5 \pm 2,1$ ka (Präzession), indem sie von ihren drei neuen RIA zwei auswählen (FEO-2: $242,01 \pm 0,26$ Ma, *avisianum*-Subzone und SEC-B: $241,705 \pm 0,045$ Ma, frühe *N. secedensis*-Zone) und die angeblich nicht passende dritte RIA SEC-C ausschließen: *Out of stratigraphic order/no weighted mean calculated*. Die RIA SEC-B und SEC-C differieren signifikant, denn die stratigraphisch ältere RIA SEC-B hat ein jüngerer absolutes Alter als die stratigraphisch jüngere RIA SEC-C mit dem höheren numerischen Alter (Abb. 5: W 18). Indem hier auch die RIA SEC-C zusammen mit der RIA MSG.09 (MUNDIL et al. 2010) berücksichtigt wird, die für ≈ 40 ka lange Zyklen sprechen, ist die Zyklendauer von $18,5 \pm 2,1$ ka (Präzession) nicht aufrecht zu erhalten.

Das Alter der Probe SEC-C wird wie folgt anhand ihrer in STORCK et al. (2019: Fig. 7) angegebenen Alter der einzelnen Kristalle abgeschätzt: Die beiden ältesten Datierungen dürfen zweifellos nicht in den Mittelwert eingehen; die sieben anderen Alter ergeben ein mittleres Alter von $242,2-242,1$ Ma. Das hieraus abgeleitete CA-TIMS-Alter von $\approx 242,15$ Ma liegt zentrisch auf der South China–Southern Alps CA-TIMS time line (Abb. 5). Dies spricht klar für die Relevanz und Berücksichtigung der RIA SEC-C. Im Unterschied dazu tangieren die Alter SEC-B und FEO-2, mit denen WOTZLAW et al. (2018) ihren $18,5 \pm 2,1$ ka-Zyklus begründen, die CA-TIMS Regressionsgerade nicht, sondern sind jünger (Abb. 5).

Latemar – Das vorstehende Modell für die hemipelagische Buchenstein-Formation ist konsistent mit der folgenden Interpretation der lagunären Latemar-Zyklen, wobei die Latemar-Zeitskala von GOLDHAMMER et al. (1987) heute ausgeschlossen werden kann. Die kleinsten und mit dem Auge am ehesten zu erfassenden Zyklen sind im Mittel 87 cm mächtig und haben eine Sub-Milankovitch-Dauer, also keine orbital-klimatische Ursache.

Im Unterschied dazu rechneten die Zyklen-Pioniere ihren ca. 550 Zyklen je 20 ka zu und kamen so zu einer Zeitspanne von ca. 11 Ma. Erstens kontrastiert diese nach BRACK & RIEBER (1993) sowie BRACK et al. (1996) mit der biostratigraphischen Reichweite der Latemar-Karbonate, nämlich der späten *R. reitzi*-, *N. secedensis*-, *E. curionii*- und frühen *P. gredleri*-Zone (Abb. 3b, 5). Zweitens zeigen die RIA aus der Buchenstein-Formation, dass die Untere Zyklische Fazies (LCF), die Mittlere Tepee Fazies (MTF) und die Obere Zyklische Fazies (UCF) selbst bei maximaler Ausschöpfung der Vertrauensbereiche der RIA in

$\leq 4,7$ Ma akkumulierten (MUNDIL et al. 1996). Drittens gehören die Latemar-Karbonate nach biostratigraphischen und radio-isotopischen Indikationen nur in einen kleinen Teil der ca. 10 Ma langen Mittleren Trias. Damit ist auch die Interpretation der Spektralanalyse von HINNOV & GOLDHAMMER (1991), PRETO et al. (2001) und PRETO (2003) obsolet, welche die These von GOLDHAMMER et al. (1987) stützen (s. u.).

Konsistent mit der Mehrzahl der RIA ist die folgende Interpretation, die der von ZÜHLKE et al. (2003a: 78) entspricht: Spektralanalytisch ermittelten ZÜHLKE (2003) und ZÜHLKE et al. (2003a) eine Relation der Zyklen von 1:9,9:24 (ZÜHLKE et al. 2003a: 78). Die Relation von ca. 1:2,5 (= 9,9:24) spricht für die Relation von Erdneigung (≈ 40 ka) zu kurzer Exzentrizität (≈ 100 ka) (s. o.). So gedeutet akkumulierten die Latemar-Karbonate in $\approx 2,8$ Ma, wobei ihre 660 Zyklen (ZÜHLKE et al. 2003a, b: 619–701 Zyklen) im Mittel eine Dauer von 4,2 ka (Abb. 3a, b, 5) haben. Diese Dauer passt zu dem viel diskutierten Ergebnis der Spektralanalyse, dass zumeist fünf Latemar-Zyklen einen übergeordneten Zyklus bilden, hier mit einer Dauer von ≈ 21 ka (lange Präzession). Biostratigraphisch reichen die Latemar-Karbonate so bis in die *P. gredleri*-Zone (Abb. 3b mit einer langen *E. curionii*-Zone von $\approx 1,7$ Ma und in Abb. 5 mit einer kurzen *E. curionii*-Zone von 1,1 Ma). Denkbar ist eine noch kürzere Latemar-Abfolge von 2,3 Ma auf der Basis von ca. 125 Präzessionszyklen à $\approx 18,5$ ka (619 Zyklen (ZÜHLKE et al. 2003a) mit einer mittleren Dauer von $\approx 3,7$ ka und einer stratigraphischen Reichweite von der späten *R. reitzi*-Zone s. l. bis in die früheste *P. gredleri*-Zone; Abb. 5).

Die Ergebnisse der Spektralanalyse von PRETO (2003: Fig. 13), welcher der Latemar-Abfolge eine Dauer von ≥ 12 Ma zuerkennt, werden hier wie folgt reinterpretiert und einbezogen. Die Zeitspannen, die er ableitet, werden auf jeweils ein Fünftel reduziert (Tab. 5). So entsteht volle Konsistenz mit den RIA: (1) Der augenfällige 87 cm-Zyklus (PRETO 2003: II-5, Fig. 17: Präzession = 17,6 ka) wird zu einem Sub-Milankovitch-Zyklus mit einer mittleren Dauer von $\approx 3,7$ ka (vgl. Abschn. 7.3.2). (2) Seine kurze Exzentrizität (98,8 ka) wird zur Präzession (≈ 20 ka). (3) Der stärkste Peak bei 200 ka (unbenannt) spiegelt die Schiefe der Ekliptik (≈ 40 ka) wider, die auch in der umgebenden Buchenstein-Formation prägnant ist. (4) Der unscheinbare Peak bei ≈ 400 ka (lange Exzentrizität) widerspiegelt wohl die kurze Exzentrizität (≈ 100 ka). (5) Der sehr markante Peak am linken Rand des Bildes (unbenannt) wird als lange Exzentrizität (≈ 400 ka) gedeutet. Das vorstehende komplette Milankovitch-Spektrum fanden auch ZHANG et al. (2019) in mitteltriassischen lakustrinen Schichten des Ordos Beckens in Mittel-China.

PRETO 2003: Fig. 13: Multitaper- Leistungsspektrum		MENNING 2019 diese Arbeit		PRETO 2003 : MENNIN G 2019
Milankovitch-Zyklen [≈ ka]				
Präzession	17,6	sub-Milankovitch	≈ 3,7	5:1
Schiefe der Ekliptik	-	-	-	-
E2 Exzentrizität namenlos	98,8	Präzession	≈ 18,5	5:1
E1 Exzentrizität namenlos	(400)	Schiefe der Ekliptik	≈ 40	5:1
	>>1000	kurze Exzentrizität	≈ 100	(4):1
		lange Exzentrizität	≈ 400	(5):1

Tab. 5: Die Dauer von Latemar-Zyklen nach PRETO (2003) und in dieser Arbeit

Generalisiert heißt das:

≈ 4 ka = Sub-Milankovitch-Zyklus (sub-Milankovitch cycle)

≈ 40 ka = Erdneigungs-Zyklus (Erdachsenneigungs-Zyklus, Schiefe der Ekliptik-Zyklus, obliquity cycle)

≈ 100 ka = kurzer Exzentrizitäts-Zyklus (short eccentricity cycle).

Auch KENT et al. (2004: Fig. 4) reinterpretieren PRETO et al. (2001, im Teil 2 der zusätzlichen Informationen im GSA Data Repository), indem sie die Zeitspannen auf ein Zehntel kürzen. (1) Der Spektral-Peak P1 (20 ka, Präzession) wird so zu einem Sub-Milankovitch-Zyklus (1,7 ka). (2) Der deutlichste Peak B (unbenannt) wird zur Präzession (20 ka). (3) Dem Peak A wird eine Dauer von 100 ka (kurze Exzentrizität) zugeschrieben. Nach HINNOV (2006: 843/844) ist diese Deutung inkorrekt aufgrund der verwendeten Fenstergröße bei der Analyse des Spektrogramms.

Die drei sehr verschiedenen Interpretationen verunsichern. Hinzu kommt die Frage, ob die Latemar-Zyklen überhaupt Allozyklen sind. EGENHOFF et al. (1999: 908) beantworten sie wie folgt: *Parts of the succession, some tens of meters thick, show a higher percentage of inter- to supratidal facies than other parts, which are dominated by subtidal sediments. These differences clearly represent long-term changes in palaeobathymetry that can be observed and correlated between the tepee belt and the lagoon. An exclusively autocyclic model (PRATT & JAMES 1986 [Ordovician]) for the interpretation of the Latemar shallowing upward cycles can be ruled out. Platform-wide subaerial exposure horizons cannot be formed purely autocyclically, and the presence of subtidal facies involved in the tepees indicate relative sea-level fall and an allocyclic origin of the small-scale cycles. Long term changes in palaeobathymetry are related to allocyclicality as well.*

Es erstaunt, dass die Interpretation von ZÜHLKE (2003) und ZÜHLKE et al. (2003a, b) nicht bereits allgemein akzeptiert wird. Möglicherweise haben eine Überkonzentration auf die Frage, ob die Basiszyklen 20 ka dauern oder nicht, die zwar qualitative, aber nicht quantitative Differenzierung zwischen den ungleichwertigen RIA, die z. T. wenig sicheren biostratigra-

phischen Indikationen und der Streit darum, ob die charakteristische Remanenz in den Latemar-Karbonaten syngenetisch ist oder nicht dazu geführt, dass die Schiefe der Ekliptik mit ihren 40 ka-Zyklen nicht bereits früher als die entscheidende Größe bei der Akkumulation der Plattformkarbonate erkannt wurde.

Entscheidend für die Relevanz der vorstehenden Interpretationen ist erstens, ob die Latemar-Karbonate im Wesentlichen in den normal polarisierten Teil der *N. secedensis*-Zone (KENT et al. 2004) oder in die späte *R. reitzi*- und die *N. secedensis*-Zone (MUNDIL et al. 2010) sowie die *E. curionii*-Zone und Teile der *P. greddleri*-Zone (BRACK & RIEBER 1993: 458) fallen. Gegen die Deutung von KENT et al. (2004) spricht die nur kurze Dauer der *N. secedensis*-Zone von ca. 0,6 Ma (s. Abschn. 5.1.2.3) und die noch kürzere normal polarisierte Magnetozone Fr1n.2n, die im Frötschbach-Profil ca. 59% der *N. secedensis*-Zone einnimmt (MUTTONI et al. 1996b: Fig. 2). Diese in den Latemarkarbonaten 390 m mächtige Magnetozone dauert somit ca. 350 ka. Dies entspricht einer geologisch außergewöhnlichen Absenkungsrate von 1100 m/Ma. Selbst bei einer längeren Dauer der normal polarisierten Zone SC2n von 0,6 Ma (MUTTONI, in LANGEREIS et al. 2010: Fig. 8) bleibt sie extrem hoch (Abschn. 7.2, Tab. 9). Sie wäre bestenfalls störungstektonisch (EMMERICH et al. 2008) zu erklären. KENT et al. (2004: Fig. 3) nehmen an, dass die Latemar-Abfolge eine syngenetische charakteristische remanente Magnetisierung (ChRM) normaler Polarität trägt (nur eine inverse Probe). Sie berücksichtigen nicht den intensiven Diatrem-Vulkanismus im Zentrum der Latemar-Karbonat-Plattform (NÉMETH & BUDAI 2009: Figs. 1, 2, 4, ZÜHLKE 2003: Figs. III-7, III-10), der einen Teil der paläomagnetisch untersuchten Proben remagnetisiert haben dürfte (HINNOV 2006). Zweitens ist entscheidend, ob die neu eingeführte Ammonoideenart *Chieseiceras dolomiticum* geeignet ist, die Dauer der Latemar-Abfolge auf ca. 0,6 Ma und auf die späte *R. reitzi*-Zone bis mittlere *N. secedensis*-Zone zu begrenzen (BRACK & RIEBER 2019; vgl. Abb. 5).

Die Latemar-Abfolge ist hier mit Hilfe des Kristalltuffs Tc an die Tiefwasserprofile von Bagolino und Seceda angeschlossen (Abb. 5). Der Tc-Tuff tritt im Profil der Valsordaspitze im oberen Teil der „Unteren Zyklischen Fazies“ (LCF) auf (ZÜHLKE 2003: III-7, Fig. III-5). Sollte es sich dort wirklich um den Tc-Tuff handeln, wäre er die bestmögliche Korrelationsmarke.

Die biostratigraphischen Angaben (BRACK & RIEBER 1993, ff.) und die vier RIA aus der Latemar-Abfolge (MUNDIL et al. 2003, BRACK et al. 2007) bieten aufgrund ihrer Variabilität keine Gewähr für einen sicheren Anschluss an die numerisch kalibrierte tethyale Gliederung, auch wenn die RIA LAT31 und LAT32

direkt an der CA-TIMS time line liegen (Abb. 5). Doch die RIA LAT30 (MUNDIL et al. 2003) liegt rechts und die RIA LAT30 (BRACK et al. 2007) weit links des Zeitstrahls. Beide sind inkonsistent zueinander, wobei letzteres Alter mit der Interpretation von BRACK & RIEBER (2019) übereinstimmt, nach der die Latemar-Abfolge in nur $\approx 0,6$ Ma akkumulierte. Da das Alter von $242,8 \pm 0,2$ Ma (LAT30, BRACK et al. 2007) ein Einzelwert ist, sollte dessen Aussagekraft durch weitere RIA verifiziert werden.

die weit verbreitete Autozyklizität insbesondere in karbonatisch-mergeligen Abfolgen, die unbewiesene klimatisch gesteuerte Genese vieler Zyklen, die zuweilen etwas willkürlich erscheinende Zuordnung einer bestimmten Zeitspanne zu den Zyklen und auf Experimente von RICKEN (1986), die zeigten, dass Mergelstein-Kalkstein-Rhythmen unabhängig davon durch diagenetische Prozesse entstehen können, ob es im Sediment primär zyklische Schichtung gab oder nicht.

5.2 Regionale Stratigraphische Skala

5.2.1 Allgemeines

In stratigraphischen Tabellen für Mitteleuropa wie der STD 2016 wird das Bild des Muschelkalks und Buntsandsteins seit Jahren durch die Zyklizität der Sedimente bestimmt. Dabei wird den Zyklen eine klimatische Genese unterstellt und eine bestimmte Milankovitch-Zyklizität zugeordnet. Diese Herangehensweise ist problembehaftet. Doch sie ist am ehesten geeignet, sedimentäre Abfolgen in vergleichbare Einheiten zu gliedern und die Relation stratigraphischer Einheiten untereinander sichtbar zu machen. Darüber hinaus genießen Zyklen derzeit so großes Interesse, weil sie für die Kalibrierung regionaler Zeitskalen unabdingbar sind. Sofern nämlich bestimmte Zyklen wirklich eine Milankovitch-Dauer von ≈ 40 ka, 100 ka oder 400 ka haben (Neigung der Erdachse, kurze und lange Exzentrizität, MILANKOVITCH 1941), erlauben sie die Erstellung einer Zeitskala von höchster zeitlicher Auflösung.

Kritiker dieses Konzepts verweisen zu Recht auf

Autoren	Zyklen / Kleinzyklen / Dauer Parasequenzen/Parasequenzenbündel, Chemozyklen, Dauer, Dauer hier zugeordnet					Region / Aufschluss, Zyklen à 100 ka/400 ka	Muschelkalk Dauer
	s6	s7	mu	mm	mo		
SCHÜLLER 1967	-	-	23 $\approx 2,3$ Ma	-	-	Südniedersachsen, Nordhessen, 100 ka-Zyklen	-
SCHULZ 1972: Tab. 2	-	-	18/4 $\approx 1,8/1,6$ Ma	-	-	Nordhessen 100 ka-/400 ka-Zyklen	-
KOLB 1976	-	-	16 $\approx 1,6$ Ma	-	-	Subherzyn 100 ka-Zyklen	-
KRAMM 1986: Abb. 4	-	-	20/3,5 $\approx 2,0/1,4$ Ma	-	-	Osthessen 100 ka-/400 ka-Zyklen	-
SIMON 1988	-	-	-	19	-	Kraichgau 100 ka-Zyklen	-
MENNING 1990	$\approx 1,0$ Ma	$\approx 2,0$ Ma	$\approx 3,0$ Ma	$\approx 1,5$ Ma	$\approx 4,5$ Ma	Mitteleuropa	9,0 Ma
RÖHL 1990: Abb. 5–7	-	-	-	-	7 $\approx 2,8$ Ma	Deutschland 400 ka-Zyklen	-
SIMON et al. 1992	-	-	22 $\approx 2,2$ Ma	-	-	Kraichgau 100 ka-Zyklen	-
RÖHL 1993: Tab. 1	-	-	-	-	9,5 $\approx 3,8$ Ma	Deutschland 400 ka-Zyklen	-
GAERTNER 1993	-	-	13 (16)	13	10 (14)	Nordwestdeutschland	-
GAERTNER & RÖHLING 1993	-	-	-	13 $\approx 1,3$ Ma	-	100 ka-Zyklen	-
GÖTZ 1994	-	-	19,5/3,x	-	-	West Thüringen	-
KRAMM 1994	-	-	20/3,x $\approx 2,0/1,2$ Ma	-	-	Osthessen/Rhön 100 ka-/400 ka-Zyklen	-
MENNING 1995: Fig. 1	$\approx 1,0$ Ma	$\approx 2,0$ Ma	$\approx 3,0$ Ma	$\approx 1,5$ Ma	$\approx 3,5$ Ma	Mitteleuropa	8,0 Ma
KNAUST 1998: Fig. 7	-	-	$\approx 40/10$	-	-	Südostthüringen	-
GÖTZ & FEIST-BURKHARDT 1999	-	-	19,5/3,x $\approx 2,0/1,2$ Ma	-	-	Osthessen/Rhön 100 ka-/400 ka-Zyklen	-
RAMEIL et al. 2000	-	-	29/9,x	-	-	Ostthüringen	-
KRAMM 2000	-	-	21 $\approx 2,1$ Ma	-	-	Nordthüringen 100 ka-Zyklen	-
BRÜCKNER-RÖHLING 2000, BRÜCKNER-R. & HEUNISCH 2004	-	-	-	9 $\approx 0,9$ Ma	-	Nordwestdeutschland 100 ka-Zyklen	-
KEDZIERSKI 2002: Anl. 7	-	-	20 22	-	-	Ostbrandenburg Ostthüringen	-
POPPELREITER 2002	-	-	≤ 16 $\leq 1,6$ Ma	-	-	NE Niederlande 100 ka-Zyklen	-
STD 2002	5 $\approx 0,5$ Ma	15 $\approx 1,5$ Ma	- $\approx 3,0$ Ma	- $\approx 1,5$ Ma	- $\approx 3,5$ Ma	Deutschland 100 ka-Zyklen	8,0 Ma
KOZUR & BACHMANN 2003b, 2005, 2008, BACHMANN & KOZ. '04	5, 4 $\approx 0,5, 0,4$ Ma	15, 9, 11 $\approx 1,5, 0,9, 1,1$ Ma	20, 21 $\approx 2,0, 2,1$ Ma	9 $\approx 0,9$ Ma	38, 40 $\approx 3,8, 4,0$ Ma	Deutschland 100 ka-Zyklen	6,7; 7,0 Ma
SZURLIES in MENNING et al. 2005: Tab. 1	4 $\approx 0,4$ Ma	8 $\approx 0,8$ Ma	-	-	-	Deutschland 100 ka-Zyklen	-
HAGDORN & SIMON 2005: Taf. VIII	-	-	20 $\approx 2,0$ Ma	12 $\approx 1,2$ Ma	34 $\approx 3,4$ Ma	Deutschland 100 ka-Zyklen	6,6 Ma
KÄDING in MENNING & KÄDING 2013: 199	3 $\approx 0,3$ Ma	12 $\approx 1,2$ Ma	-	-	-	Deutschland 100 ka-Zyklen	-
FRANZ et al. 2015: Fig. 5	-	-	-	-	10 Sequ. 4. Ordn.	Deutschland 100 ka-Zyklen?	-
Käding, schriftl. Mitt. 2015	-	-	22 $\approx 2,2$ Ma	19 $\approx 1,9$ Ma	11 $\approx 1,1$ Ma	Deutschland 100 ka-Zyklen	5,2 Ma
STD 2016	3 $\approx 0,3$ Ma	12 $\approx 1,2$ Ma	21 $\approx 2,1$ Ma	11 $\approx 1,1$ Ma	38 $\approx 3,8$ Ma	Deutschland 100 ka-Zyklen	7,0 Ma
NITSCH et al. 2019, Kap. 6.1: Abb. 4	$\approx 1,25$ $\approx 0,5$ Ma	$\approx 3,75$ $\approx 1,5$ Ma	$\approx 3,50$ $\approx 1,4$ Ma	$\approx 2,75$ $\approx 1,1$ Ma	$\approx 5,75$ $\approx 2,3$ Ma	Deutschland 400 ka-Zyklen	4,8 Ma
MENNING 2019, diese Arbeit	$\approx 1,25$ $\approx 0,5$ Ma	$\approx 3,75$ $\approx 1,5$ Ma	$\approx 3,50$ $\approx 1,4$ Ma	$\approx 2,75$ $\approx 1,1$ Ma	$\approx 5,75$ $\approx 2,3$ Ma	Deutschland 400 ka-Zyklen	4,8 Ma

mu = Unterer Muschelkalk, mm = Mittlerer Muschelkalk, mo = Oberer Muschelkalk
s6 = Folge s6 (Solling-Formation), s7 = Folge s7 (Röt-Formation = Untergruppe Oberer Buntsandstein)

Tab. 6: Astrochronologische Kalibrierung des Muschelkalks mit Hilfe sedimentärer Zyklen

Auch hier wird mit Zyklen kalibriert, obwohl ihre Genese zwar nicht geklärt, aber doch naheliegend klimatisch und nicht epirogen verursacht ist. Im Unterschied dazu sind solche Zyklen im Quartär und Neogen bereits unverzichtbar bei der Feinkalibrierung der GSS. Zeitlich noch höher auflösende Zeitindikationen, von Warven bis hin zu Zyklen mit einer Dauer von bis zu ≈ 20 ka, sind i. d. R. infolge von Schichtlücken, in denen ganze oder sogar mehrere Zyklen stecken können, zu kurz, um viele Millionen Jahre umfassende Abfolgen durchgehend sicher kalibrieren zu können. Zusammen mit dem Muschelkalk wird hier auch der Buntsandstein betrachtet, weil es für diesen bereits eine ausgefeilte Zylo- und Magnetostratigraphie gibt, weil er den Anschluss an die globale Perm-Trias-Grenze sichert, für die sehr viele RIA vorliegen, und weil es höchst sinnvoll ist, auch Zeitmarken aus dem Liegenden und Hangenden des Muschelkalks einzubeziehen.

Im Muschelkalk sind Zyklen ausgehalten worden durch die Ansprache in Tagesaufschlüssen und deren Korrelation, wobei Zyklen nicht selten von Litholeithorizonten begrenzt werden, außerdem auf der Basis von Gammamessungen in Bohrungen und in Tagesaufschlüssen und schließlich geochemisch anhand von Hauptelementen bzw. im evaporitischen Milieu des Mittleren Muschelkalks anhand der dort charakteristischen Abscheidungsfolge. Die weitaus meisten Untersuchungen konzentrieren sich auf den Unteren Muschelkalk (Tab. 6).

5.2.2 Unterer Muschelkalk und die Nachweisbarkeit von Zyklen

Über die Zahl der sedimentären Zyklen herrscht nur im Unteren Muschelkalk näherungsweise Einigkeit. Für ihn werden zumeist 18 bis 23 (13–40) Zyklen angegeben (Tab. 6), aus denen sich bei Deutung als 100-ka-Zyklik eine Dauer von ≈ 2 Ma ergibt (ESTD 2005: Taf. IX, MENNING et al. 2005: 178). E. Kramm (mdl. Mitt. 28.06.2019) ist sicher, dass es 21 großräumig zu verfolgende Zyklen sind. In Nordwestdeutschland sind dies zumeist Sohlbank-Zyklen, wobei eine plötzlich einsetzende Karbonatsedimentation zum Hangenden hin allmählich tonreicher wird (GAERTNER 1993: 59): *Diese zyklische Gliederung ermöglicht trotz Fazieschwankungen und Mächtigkeitsänderungen eine durchgehende Korrelierung von Bohrprofilen von der Ems bis zur Elbe und vom Ringköbing-Fünen-Hoch bis zum Mittelgebirgsrand.*

Eine Gliederung des Unteren Muschelkalks in vier Zyklen („Abschnitte“) nahm als erster SCHULZ (1972: Tab. 1) vor und zwar in Nordhessen sowie in Vergleichsprofilen in Südniedersachsen: (1) muI = Unterer Wellenkalk, (2) muII = Mittlerer Wellenkalk, (3) muIII = Oberer Wellenkalk, (4) muIV = Schaumkalk.

Einen solchen Zyklus gliedert er idealerweise in (5) Bankfolge (α), (6) Wellenkalkfolge (β), (7) Mergelkalkfolge (γ) und (8) Gelbkalkfolge (δ), wobei dieser „Ideal-Zyklus“ oft nicht vollständig entwickelt ist. Die einzelnen Abschnitte setzen sich nach SCHULZ (1972: 142) aus 3–6 Zyklen zusammen, die eine Mächtigkeit zwischen 3,5 m und 11,5 m, im Durchschnitt von 7 m haben (SCHULZ 1972: 143). Er schreibt, dass eine erstaunliche, teilweise bis in Einzelheiten gehende Ähnlichkeit bestehe zwischen dem mu-Profil in seinem nordhessischen Arbeitsgebiet und dem ca. 170 km entfernten klassischen Profil von Jena (WAGNER 1897). Er folgert weiter, dass die Zyklen des Unteren Muschelkalks durch Faziesänderungen bedingt seien, die \pm gleichzeitig das gesamte Germanische Becken erfasst hätten. Dafür sprächen das konstante Durchhalten nahezu aller Bankfolgen des mu über mehrere 100 km, die weiträumig gleichbleibenden relativen Mächtigkeiten und die über große Gebiete ähnliche fazielle Ausbildung der einzelnen Zyklen. Als Ursachen dafür kämen epirogenetische Bewegungen, eustatische Meeresspiegelschwankungen und Klimaänderungen in Frage. Aus heutiger Sicht sprechen diese Merkmale für eustatische und/oder klimatische, nicht aber für epirogene Ursachen.

Zu einer Viergliederung des Unteren Muschelkalks kommen auch NITSCH et al. in Kap. 6.1, die übernommen wird; sie passt zu dem hier favorisierten geochronologischen Modell für den Muschelkalk und Buntsandstein.

Die Möglichkeit zu einer lithostratigraphischen Feingliederung mittels Zyklen hat bereits FIEGE (1938) erkannt, doch sie funktioniert nicht überall gleichermaßen, zum Beispiel nicht in Ostbrandenburg. So betonen ZWENGER & KOSZINSKI (2009: 36), dass im Rüdersdorfer Schaumkalk Kalksteine mit nennenswerten Tonanteilen nur eine untergeordnete Rolle spielen. Selbst die Abgrenzung der beiden Großeinheiten im Unteren Muschelkalk von Rüdersdorf falle dort von Bearbeiter zu Bearbeiter unterschiedlich aus (ZWENGER & KOSZINSKI 2009: Abb. 2). Die Ursache hierfür könnte der Mangel an echten Tonmergelsteinen sein, so dass in diesen Kalklutiten eine sedimentäre Zyklizität mit Hilfe von Gammamessungen nicht nachzuweisen sei. Jeder Versuch führe zu anderen Zyklenzahlen, so dass die Vor-Ort-Bearbeiter stark bezweifeln, dass hier sedimentäre Zyklen mit Gammamessungen sicher nachzuweisen sind und dass somit eine Kalibrierung mit Hilfe von 100 ka-Zyklen prinzipiell nicht möglich sei. Auch MATYSIK (2019) schließt aus der Untersuchung eines 120 mal 50 km großen Areals in Südpolen, dass Muschelkalkzyklen für beckenweite Korrelationen „ungeeignet“ (*inappropriate*) sind.

Im Unterschied dazu sind in stärker mergelig-tonigen Abfolgen, insbesondere kleinräumig, auch kleinere Zyklen sicher zu fassen, so in den Niederlanden im Oberer Muschelkalk. Nach PÖPPELREITER (2002: 129) zeichnen sich diese Kleinzyklen im Gamma- und Dichte-Log ab. Auch RÖHL (1993: 31, 33) sieht im Oberen Muschelkalk „Tonhorizonte“ als überregionale Leithorizonte und erklärt die Schwierigkeit, in manchen Profilen Zyklen zu erkennen u. a. wegen des Nebeneinanders von Dachbank- und Sohlbankzyklen.

Die fehlende Nachweisbarkeit von Zyklen mangels toniger Anteile könnte nicht nur in Rüdersdorf die Ursache dafür sein, dass verschiedene Bearbeiter deutlich unterschiedliche Zyklenzahlen nennen (Tab. 6). NITSCH et al. kommen in Kap. 6.1, wie auch RÖHL (1990) und andere, zu dem Ergebnis, dass die vielfach genannten kleineren Zyklen (Ablagerunszyklen, Basiszyklen), denen nicht selten eine Dauer von 100 ka zugeschrieben wird, nur über begrenzte Gebiete zu korrelieren sind und dass im Germanischen Becken eine großräumige Korrelation nur mit größeren Zyklen (Kompositivzyklen, Kleinzyklen) gelingen kann. NITSCH et al., Kap. 6.1: Abb. 8: Beckeninneres) sehen im Unteren Muschelkalk 3,5 Kompositivzyklen (Tab. 6: 1,4 Ma).

Mit geochemischer Methodik fanden LIPPMANN et al. (2005) im Unteren Muschelkalk von Steudnitz bei Jena drei Zyklen anhand der Gesamtgehalte von SiO_2 , Al_2O_3 und K_2O . Interpretierte man sie als Milankovitch-Zyklen mit einer Dauer von je ca. 0,4 Ma, so hätte der Untere Muschelkalk eine Dauer von ca. 1,2 Ma.

5.2.3 Mittlerer Muschelkalk

Die Dauer des Mittleren Muschelkalks ist derzeit ausschließlich anhand seiner Zyklen abzuschätzen, denn mangels Indexfossilien ist er nicht sicher mit der tethyalen Trias korreliert. Außerdem kann dort der Bereich der *P. trinodosus*- und *R. reitzi*-Zone nicht als sicher kalibriert gelten. Zyklisch am besten gegliedert ist er in Nordwestdeutschland auf der Basis der salinaren Abscheidungsfolge und zwar dort, wo er kaum oder nicht abgelagert ist (BRÜCKNER-RÖHLING 2000). Nach der Zahl der Zyklen bzw. der „Korrelationsseinheiten“ und der ihnen zuerkannten Dauer von je ca. 100 ka könnte der Mittlere Muschelkalk etwa zwischen 0,9 Ma und 1,9 Ma lang sein (Tab. 6).

Der Dauer des Mittleren Muschelkalks in der STD 2016 von 1,1 Ma liegen die Chemozyklen von BRÜCKNER-RÖHLING (2000) zu Grunde: Den sieben Zyklen der Folge m5 (Heilbronn-Formation) wurden je 100 ka zugerechnet. In der Bohrung Remlingen 7 sind sie zwischen 4 m und 13 m mächtig (Anhydrite, dolomitische Mergel, Mergel, ohne Salze). Für die mergeligen Dolomite und dolomitischen Mergel der Folge m4

(Karlstadt-Formation) und m6 (Diemel-Formation) wurden entsprechend der obigen Mächtigkeiten je zwei 100 ka-Zyklen angesetzt.

Nach NITSCH et al. (Kap. 6.1: Abb. 8: Beckeninneres) entfallen auf den Mittleren Muschelkalk ca. 2,75 Kleinzyklen. Dies ergibt ebenfalls eine Gesamtdauer von ca. 1,1 Ma: ca. 200 ka des späten Zyklus MU4, je ca. 400 ka der Zyklen MM1 und MM2 sowie ca. 100 ka des frühen Zyklus MO1.

5.2.4 Oberer Muschelkalk und Dauer der Ceratitenzonen

Im Oberen Muschelkalk hält RÖHL (1993: Tab. 1) 9,5 Parasequenzen 2. Ordnung aus. Ordnet man ihnen eine Dauer von je 0,4 Ma zu, ergibt sich eine Zeitspanne von 3,8 Ma, die in die STD 2016 eingegangen ist. RÖHL (1990: Abb. 5–7) gliedert den Oberen Muschelkalk in sieben Zyklen 2. Ordnung, davon je einen in den Gelben Basisschichten und im Haupttrochitenkalk und fünf in den Ceratitenschichten (nach Mn- und V-Gehalten). NITSCH et al. (Kap. 6.1: Abb. 8), sehen im Oberen Muschelkalk ca. 5,75 Kleinzyklen, denen hier eine Dauer von je 400 ka und eine Gesamtzeitspanne von ca. 2,3 Ma zugewiesen wird (Tab. 6, Abb. 8).

Für die 15 Ceratitenzonen des Oberen Muschelkalks ergibt sich bei einer Länge von 3,8 Ma (STD 2016) eine arithmetische Dauer je Zone von ca. 250 ka (Abb. 7). Aus den 3,4 Ma von HAGDORN & SIMON (2005) resultiert eine durchschnittliche Dauer von 230 ka. Auf der Basis von 2,3 Ma (Abb. 8) dauert eine Zone ca. 150 ka. Setzte man lediglich ca. 1,1 Ma an (Abb. 9), so betrüge die mittlere Dauer einer Ceratitenzone sogar nur ca. 75 ka (Tab. 4).

5.2.5 Muschelkalk-Gruppe

Für die Muschelkalk-Gruppe wird die Zyκλοstratigraphie von NITSCH et al. (Kap. 6.1) übernommen. Den 12 Zyklen wird hier eine klimatisch-orbitale Genese und eine Länge von je ca. 0,4 Ma zugeschrieben. Für die Gruppe ergibt sich eine Dauer von ca. 4,8 Ma (Tab. 6, Abb. 8). Diese Interpretation resultiert aus weiträumigen Korrelationen im Germanischen Becken (Kap. 6.1), sie ist konsistent mit den RIA und die kürzeste für den Muschelkalk je abgeschätzte Zeitspanne.

RIA und Zyklen stützen und kontrollieren sich gegenseitig. Sie bilden ein neues, kraftvolles Paar zur Kalibrierung von GSS und RSS. Wo es keine oder nur wenige RIA gibt, kann der zeitliche Umfang einiger Schichten und Biozonen sowohl der Germanischen als auch der tethyalen Trias mit Hilfe von Zyklen sicherer als zuvor abgeschätzt werden (Abschn. 5.1.2, 5.1.3).

Deutlich längere Zeitspannen als 4,8 Ma für den Muschelkalk (9,0–6,6 Ma) sind damit obsolet (Tab. 6). Sie resultierten aus den zu ihrer Zeit verfügbaren RIA,

aus einer Reichweite des höheren Muschelkalks bis ins Longobardium | Langobardium (PIA 1930, KOZUR 1975, 1999, BUDUROV et al. 1993) bzw. einem Ende des Muschelkalks an der Basis des Longobardiums | Langobardiums (NAWROCKI & SZULC 2000, BACHMANN & KOZUR 2004, KOZUR & BACHMANN 2005, 2008, KOZUR & WEEMS 2010) (Abb. 6). Dagegen legen neue RIA aus dem Longobardium | Langobardium und späten Fasnium (BRÜHWILER et al. 2007, MIETTO et al. 2012, WOTZLAW et al. 2018) in Kombination mit den 12 Muschelkalkzyklen à 400 ka (Kap. 6.1; Abb. 8) bzw. den 52 Muschelkalkzyklen à 100 ka (schriftl. Mitt. K.-C. Käding 2015; Abb. 9) ein Ende der Muschelkalk-Gruppe bereits im frühen Fasnium (*E. curionii*-Zone) nahe (Abb. 8, 9).

6. Integration von Globaler und Regionaler Stratigraphischer Skala

6.1 Korrelationsmethoden

Hier werden die GSS und die RSS biostratigraphisch und untergeordnet auch magnetostratigraphisch korreliert. Darüber hinaus stehen für die Korrelation erstmals die numerischen Alter von GSS und RSS zur Verfügung, weil beide Skalen unabhängig voneinander numerisch kalibriert wurden: die GSS mit Hilfe von RIA (Abb. 5) und die RSS anhand von Zyklen (Tab. 6). Für die Korrelation zwischen Mitteleuropa und den Südalpen eignet sich potenziell auch die Lithostratigraphie (vgl. Abschn. 4.1). Chemo- und sequenzstratigraphische Marken stehen dafür nicht zur Verfügung bzw. sind dafür noch nicht genutzt worden. In den Südalpen selbst ermöglichen charakteristische Tuffe tephrostratigraphische Korrelationen, welche die Relevanz von RIA belegen (Tab. 7).

Methode	regional im Muschelkalk		überregional / global		Korrelation M.-Europa – Süd/Südosteuropa
	Korrelation	Kalibrier.	Korrelation	Kalibrier.	
Lithostratigraphie / Leitbankstratigraphie	X	-	-	-	-
Biostratigraphie	X	-	X	-	X
Magnetostratigraphie	X	-	X	-	X
Chemostratigraphie	-	-	-	-	-
Sequenzstratigraphie	x	-	x	-	-
Tephrostratigraphie	-	-	Alpen	-	-
Radio-isotopische Altersbestimmung	-	-	X	X	-
Zyklostratigraphie	X	X	-	Alpen	x

Tab. 7: Methoden zur numerischen Kalibrierung des Muschelkalks und der globalen Mittleren Trias, zur Korrelation im Muschelkalk und zu seiner Einbindung in die Globale Stratigraphische Skala

6.2 Korrelationen zwischen Mitteleuropa und Süd- und Südost-Europa 1930–2019

Die beträchtlich variierenden Korrelationen zwischen Mitteleuropa (RSS) und Süd- und Südost-Europa

(GSS) sowie Süd-China basieren bisher ausschließlich auf biostratigraphischen Indikationen zumeist aus dem marinen Milieu (Abb. 6). Indem hier zusätzliche Zeitindikationen hinzukommen, nämlich RIA in der GSS in Kombination mit Zyklen der RSS, die sich ergänzen und gegenseitig kontrollieren, entsteht ein stabileres Korrelationsschema mit deutlich besserer zeitlicher Kalibrierung (Abschn. 6.4).

Der Muschelkalk von Deutschland (SUBKOMMISSION PERM-TRIAS 2011) ist in Abb. 6 in Relation zu globalen stratigraphischen Einheiten dargestellt. Eine Ordnung ist auf den ersten Blick schwer zu erkennen: Die Meinungen variieren selbst in Arbeiten derselben Autoren erheblich: So legt KOZUR (1975: 56) die Basis der Pelsonium-Unterstufe nahe an die Basis des Muschelkalks. Dagegen sieht sie KOZUR (1999) in Übereinstimmung mit PIA (1930) am Top der Oolithbänke. BACHMANN & KOZUR (2004), KOZUR & BACHMANN (2005, 2008) und KOZUR & WEEMS (2010) legen die Basis unter die Oolithbänke. Nach URLICHS (1978: 5) lässt sich mit dem Nachweis von *Protrachyceras recubariense* die mittlere *spinus*-Zone Südwestdeutschlands mit der *E. curionii*-Zone der Südalpen korrelieren. Diese Korrelation wurde später durch BRACK et al. (1999) dahingehend modifiziert, dass die *spinus*-Zone in die *N. secedensis*-Zone fällt.

Die Basis des Anisiums wurde im Germanischen Becken zunächst sehr hoch gesehen. Sie fällt bei PIA (1930) zusammen mit der Basis des Muschelkalks. Jedoch reicht der Buntsandstein deutlich in das Anisium hinein (KOZUR 1975). Nach der vorliegenden Arbeit korrelieren die Unterstufen Aegaeum und Bithynium mit dem Hauptteil des Röt; das Pelsonium beginnt etwa an der Basis der Myophorienschichten (Abschn. 6.4.1, Abb. 6). Auch nach KOZUR (1975) fällt die Basis des Pelsoniums etwa mit der Basis des Muschelkalks in der Fassung der SUBKOMMISSION PERM-TRIAS (2011) zusammen oder liegt etwas tiefer, denn *ähnliche pelsonisch/unteranisische Mischfaunen mit deutlich überwiegender pelsonischen Elementen finden sich in den basalen 5 m des mu₁* (KOZUR 1975: 56), wobei zu beachten ist, dass der mu₁ sensu Kozur mit den Myophorienschichten beginnt. KOZUR (1975: 60) konstatiert, dass der basale mu₁ wegen des erstmaligen reichen Einsetzens pelsonischer Elemente bereits zum Pelson zu stellen sei. Damit stützt er die hier vertretene Ansicht, die sich heute jedoch auf die Palynostratigraphie (Abb. 6: VISSCHER et al. 1993) und RIA aus Süd-China (Abb. 5) gründet (Abschn. 6.4.1). KOZUR (1999) legt die Pelsonium-Basis deutlich höher in den Unteren Muschelkalk an die Obergrenze der Oolithbänke (Abb. 6).

Die Ursache für die geschilderte variable Position von Grenzen der mitteltriassischen Stufen und Unterstufen im Muschelkalk liegt u. a. in unterschied-

Von allergrößter Wichtigkeit ist die Feststellung, dass Aegaeum und Bithynium bei weitem die kürzesten Unterstufen der Mittleren Trias sind. Sie korrelieren lediglich mit dem mittleren Teil des Röts. Nach KOZUR (1975: 59) gehört der unterste Teil des Röts inkl. der Myophoriendolomite in das Olenekium, also in die Frühe Trias. Das höchste Röt (Myophorienschichten) gehört palynostratigraphisch bereits ins Pelsonium (VISSCHER et al. 1993). Demzufolge korreliert nur der große mittlere Teil des Röts mit den Unterstufen Aegaeum und Bithynium. Er besteht jedoch lediglich aus ca. acht orbitalen Zyklen à 100 ka (Zyklen s7.3 bis s7.10 nach KÄDING, in MENNING & KÄDING 2013) bzw. gut zwei Zyklen à 400 ka nach NITSCH et al.

(Kap. 6.1). Übereinstimmend damit beschränken auch die RIA von LEHRMANN et al. (2006) aus Süd-China die Unterstufen Aegaeum und Bithynium auf eine Zeitspanne von nur ca. 0,8 Ma (Abb. 5).

6.3 Duale geologische Zeitskala für die Frühe und Mittlere Trias, den Buntsandstein und Muschelkalk

Wegen der systematischen Differenzen zwischen CA-TIMS- und TIMS-RIA (Abb. 3a, b, 5) werden hier für die GSS zwei alternative Zeitskalen präsentiert: In beiden sind die stratigraphischen Einheiten und ihre Dauer identisch, doch die absoluten Alter der Skalen sind um 1,1 Ma gegeneinander versetzt (Abb. 7). Die TIMS-Zeitskala basiert auf der Pionierarbeit von

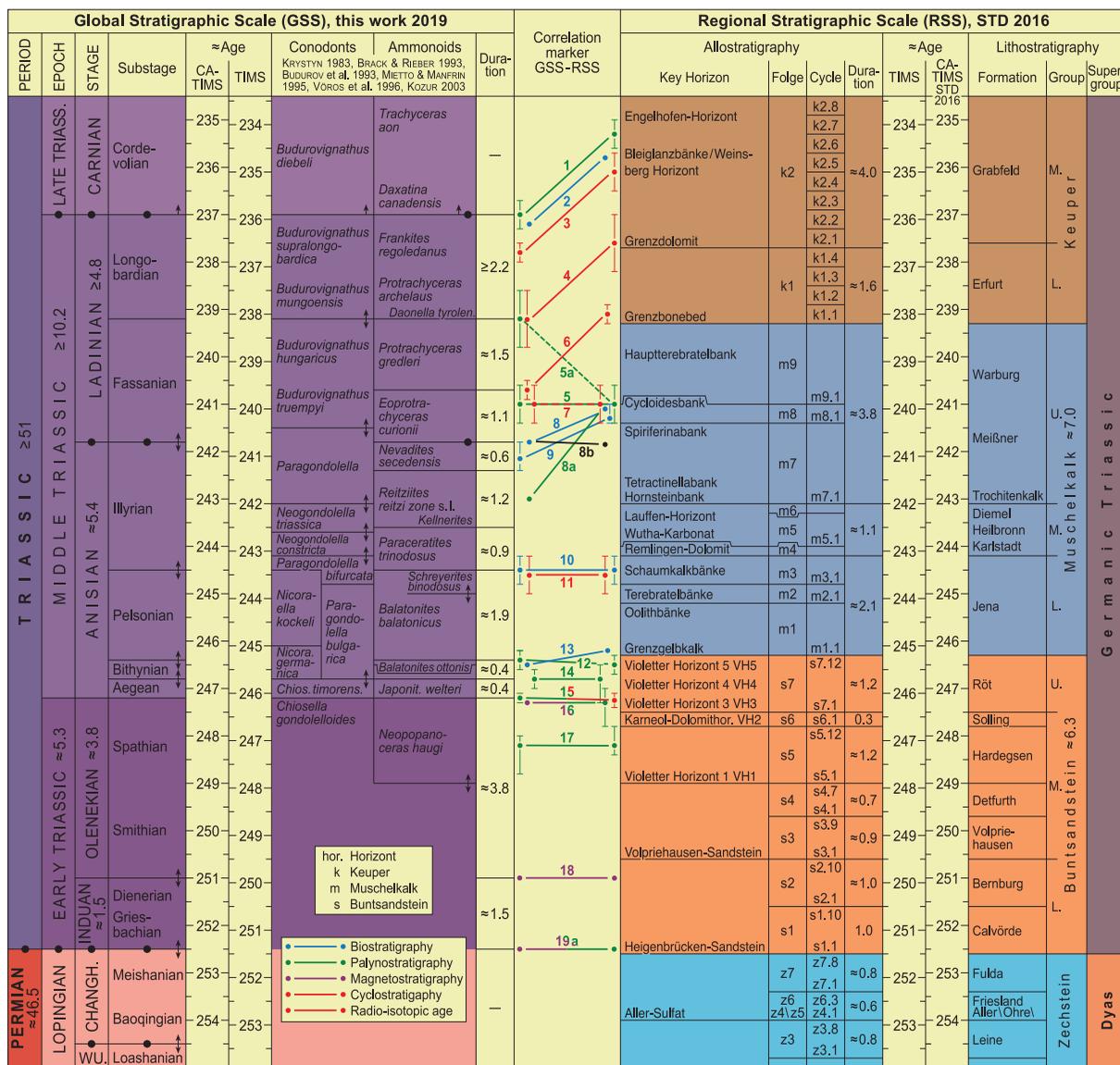


Abb. 7: Duale Globale Geologische Skala (GSS) für die Frühe und Mittlere Trias. Aufgrund der leicht inhomogenen RIA ist die TIMS-Zeitskala 1,1 Ma jünger als die CA-TIMS-Zeitskala. Die Perm-Trias-Grenze hat hier ein CA-TIMS-Alter von 252,5 Ma. Rechts die Regionale Geologische Zeitskala (RSS) der STD 2016, die zyκλοstratigraphisch kalibriert ist und als Ankerpunkt ein Alter von 252,6 Ma für die Zechstein-Buntsandstein-Grenze nutzt. Die diachronen Korrelationslinien 1 bis 8 im Muschelkalk und Keuper signalisieren, dass der Muschelkalk mit ≈ 7,0 Ma zu lang abgeschätzt ist. Zyklen im Zechstein und Buntsandstein: KÄDING in MENNING & KÄDING (2013), im Muschelkalk: HAGDORN et al. (im Druck), im Keuper: NITSCH (2018).

MUNDIL et al. (1996) mit ihren grundlegenden Datierungen, die vielfach genutzt worden sind, so auch zur Kalibrierung der Germanischen Trias.

Zum Gebrauch empfohlen wird die CA-TIMS-Zeitskala, weil sie auf der deutlichen Mehrheit der RIA basiert und weil künftig vor allem CA-TIMS-RIA hinzukommen dürften.

Die RSS von Mitteleuropa ist zyκλοstratigraphisch kalibriert. Notwendigerweise wurde dabei der Buntsandstein einbezogen, weil er (1) das Bindeglied zur globalen Perm-Trias-Grenze ist, weil er (2) sehr sicher in sieben Folgen gegliedert wurde (BOIGK 1959,

SUBKOMMISSION PERM-TRIAS 2011), weil (3) die Zahl der 100 ka-Zyklen in jeder Folge relativ gut bekannt ist, z. B. variiert sie zwischen KÄDING und SZURLIES (beide in MENNING et al. 2005: Tab. 1) kaum, weil es (4) im Zentrum des Mitteleuropäischen Beckens keine Schichtlücken gibt, in denen ein voller 100 ka-Zyklus stecken könnte und weil (5) der Buntsandstein magnetostratigraphisch höchst detailliert bearbeitet wurde und es für ihn eine solide magnetische Polaritäts-Zeitskala gibt, die eine Korrelation mit der tethyalen Trias ermöglicht (SZURLIES 2001, 2007, SZURLIES et al. 2003, MENNING & KÄDING 2013).

Anders als im Buntsandstein gibt es für den Muschelkalk keine weithin akzeptierte zyκλοstratigraphische Interpretation (Tab. 6) und nur wenige solide magnetostratigraphische Resultate. Die hier favorisierte Zeitskala für den Muschelkalk basiert auf den Zyklen von NITSCH et al. (Kap. 6.1), denen je 400 ka zugewiesen sind.

Zum Vergleich wird die noch weitgehend unpublizierte Sicht von K.-C. Käding (schriftl. Mitt. 2015, 100 ka-Zyklen; Kap. 7.2) dargestellt. Die Relevanz dieser regionalen Zeitskalen und die der STD 2016 wird überprüft durch den Vergleich mit der globalen Zeitskala, für den vielfältige Korrelationsmarken genutzt werden (Abb. 7, 8, 9, Abschn. 6.4).

6.4 Marker für die integrative Korrelation von RSS und GSS

Für die Korrelation von RSS und GSS werden biostratigraphische, magnetostratigraphische und numerische Zeitindikationen (RIA in der GSS, Zyklen in der

Stratigraphische Position			Korrelations-Marke RSS-GSS	Autoren
No	GSS	RSS		
1	Ladinium-Karnium-Grenze	k2	Sporomorphe	SCHULZ & HEUNISCH (2005)
2	Longobardium Lanobardium, spätestes	k2.6	<i>Myophoria kefersteini okeni</i> (Muschel)	URLICHS & TICHY (2000) URLICHS (2014)
3	Longobard. Langob., <i>F. regoledanus</i> -Zone	k2	237,8 Ma (RIA) – ≈ k2.4-k2.5 (Zyklen)	MIETTO et al. (2012:), DIESE ARBEIT nach NITSCH et al. = Kap. 6.1
4	Fassanium-Longobardium-Grenze	k2.1	239,2 Ma (RIA) – ≈ k2.1 (Zyklus)	BRÜHWILER et al. (2007: 448–450) DIESE ARBEIT: Abschn. 6.4
5	<i>E. curionii</i> - <i>P. gredleri</i> -Grenze ("Fassan.-Longobard.-Grenze")	m9-k1	FOD <i>Heliosaccus dimorphus</i> , <i>Ovalipollis pseudoalatus</i> (Sporom.)	VISSCHER et al. (1993: 146, Fig. 1), <i>curionii-gredleri</i> -Info: H. VISSCHER (9.2.2019), L. KRZYSTYN (30.4.2019)
6	Fassanium, <i>E. curionii</i> - <i>P. gredleri</i> -Gr.	k1	240,7 Ma (RIA) – ≈ k1.1-k1.2 (Zyklen)	WOTZLAW et al. (2018: 80–81), DIESE ARBEIT: Abschn. 6.4
7	Fassanium, <i>E. curionii</i> -Zone	m9-k1	MO6-k1.1 (Zyklen-Grenze) ≈ 241 Ma	DIESE ARBEIT: Abschn. 6.4
8	Anisium-Ladinium-Grenze = Illyrium-MO4-5	m8-m9, MO4-5	Ammoniten, Conodonten	KOZUR (1999)
8a	Fassanium-Grenze (<i>E. curionii</i> , *Basis <i>R. reitzi</i> -Zone s. str.)	*m8-m9 MO4-5	LOD <i>Stellapollenites thiergartii</i> (Sporomorphe)	VISSCHER et al. (1993: 145, Fig. 1)
8b		<i>phil./rob</i> [m7b]	Sequenzstratigraphie: max. Überflutungsfläche	FRANZ et al. (2015: 4, Fig. 2)
9	Illyrium, <i>N. secedensis</i> -Zone	≈ MO3-MO4	<i>Protrachyceras recubariense</i> = <i>Nevadites</i> (Am.)	BRACK et al. (1999: 864), DIESE ARBEIT: Abschn. 6.4
10	Pelsonium-Illyrium-Grenze	m3, MU4	<i>Paragondolella bifurcata</i> (Conodont)	KOZUR (1999: 719) DIESE ARBEIT: Abschn. 6.4
11	Pelsonium, spätes	m3, MU	244,6 Ma (RIA) – ≈ MU3-MU4 (Zyklen)	OVTCHAROVA et al. (2006: 470–472) DIESE ARBEIT: Abschn. 6.4
12	Bithynium-Pelsonium-Grenze	≈ s7.9-s7.10 SO3-4	FOD <i>Cristianisporites triangulatus</i> (Sporomorphe)	DIESE ARBEIT: Abb. 9 nach BRUGMAN (1986: 65), KÄDING in MENNING & KÄDING (2013: 199), Abschn. 6.4
13	Bithynium, spätestes	m1, MU1	<i>Balatonites ottonis</i> (Ammonit), <i>diachron</i>	BRACK et al. ('99: 857, f.), Abschn. 7.1, Abb. 11, KÄDING in ME. et al. '05
14	Aegaeum-Bithynium	Pelitröt	Sporomorphe	BRUGMAN (1986: 64)
15	Olenekium-Anisium-Grenze = Spath.-Aegaeum-Gr.	≈ s7.3, SO1	Sporomorphe 247,2 Ma (RIA) – ≈ s7.3 (Zyklus)	BRUGMAN (1986), VISSCHER et al. (1993) LEHRMANN et al. (2006: 1053), DIESE A.: Abb. 9, MENNING & KÄDING (2013: 199)
16	Spathium, spätestes	≈ s7.1-s7.2	(1) B (revers)-C (norm.) (2) CG10r-CG11n (3) sr10-sn11 (Abb. 1) Sporomorphe	DIESE A.: Abb. 3: nach (1) MUTTONI et al. ('94: Fig. 2), (2) SZURLIES ('07: Fig. 8), (3) MENNING & KÄDING (2013: 199), BRUGMAN (1986)
17	Spathium, mittleres	≈ s5.7-s5.12	<i>Cycloverrutriletes presselensis</i> (Sporom.)	HEUNISCH (1999: 215), FJAL-KOWSKA-MADER (1999: Table 3)
18	Indus.-Olenek.-Gr. = Diener.-Smithium-Gr.	≈ s2.6-s2.7	Magnetozone sn3 (späte) – PTn2 (späte)	MENNING et al. (2005: Abb.1) z. T. nach TONG et al. (2004: 23, Fig. 4)
19a	Changhsingium-Indusium-Grenze = Perm-Trias-Grenze	s1.2	Sporomorphe Magnetozone sn1 (frühe)	ECKE (1986); SZURLIES (2001: Abb. 68), SZURLIES et al. ('03: Fig. 10,11) z. T. nach SCHOLGER et al. (2000), MENNING&SZUR. in ME. et al. (2005: Abb. 1) z. T. nach LI & WANG (1989)
19b		z7.7-z7.8	Magnetozone sn1 (frühe)	KÄDING in MENNING et al. (2005: Abb. 1) z. T. nach LI & WANG (1989)

Gr. = Grenze, rot = numerisches Alter: radio-isotopische Altersbestimmung (RIA) und Zyklen, hell-blau = flach/mittelflach marin, dunkel-blau = mittelflach-/tiefmarin, grün = Sporomorphe, lila = Umpolung des Erdmagnetfeldes bzw. Magnetozone, Am. = Ammonit

Tab. 8: Stratigraphische Marken zur Korrelation der Globalen Stratigraphischen Skala (GSS) und der Regionalen Stratigraphischen Skala (RSS)

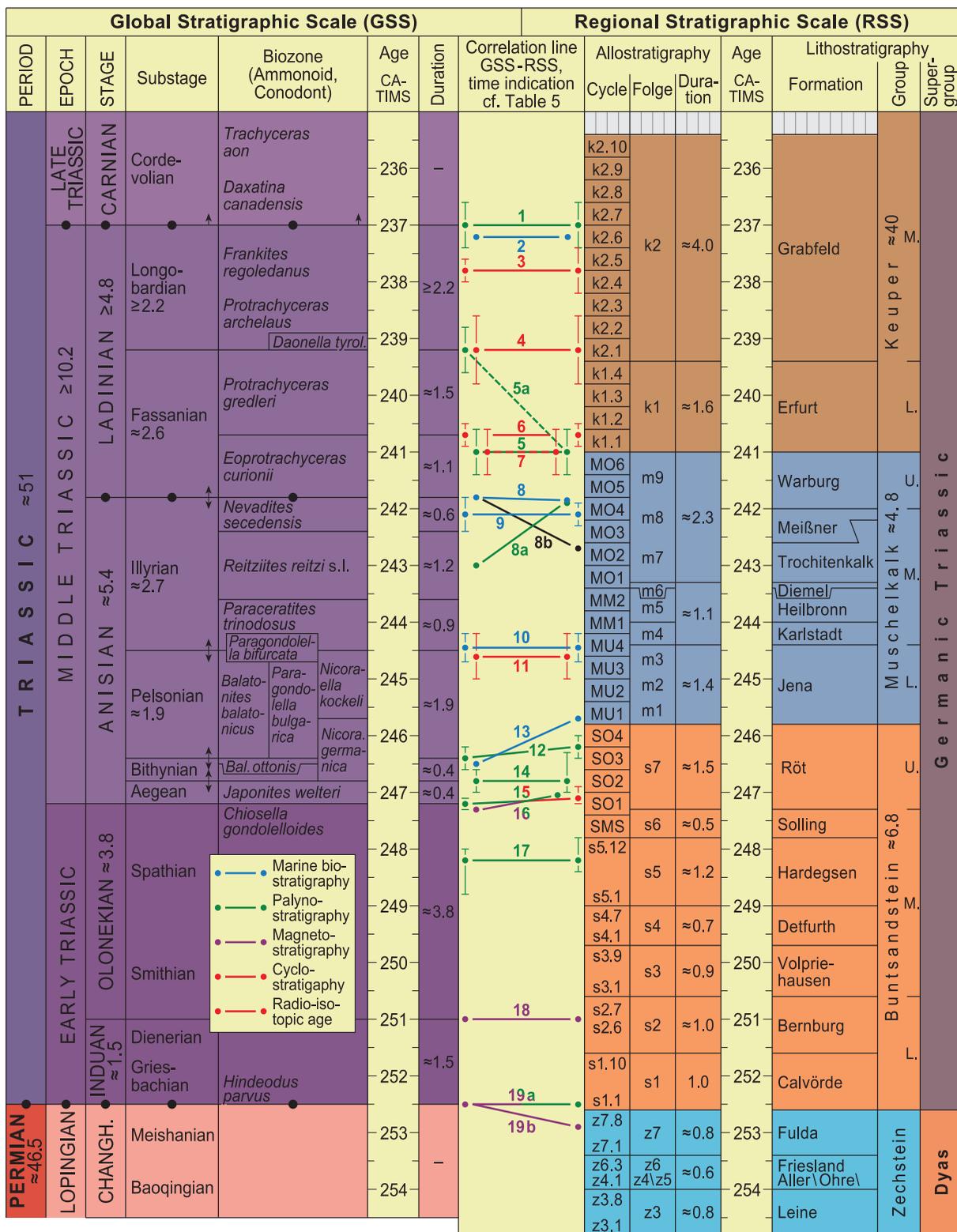


Abb. 8: Globale Geologische Zeitskala (GSS) für die Frühe und Mittlere Trias auf der Basis von CA-TIMS-RIA, der Integration von TIMS- und Multikorn-RIA und von Mächtigkeiten hemipelagischer Sedimente (identische GSS in Abb. 9, 10, 11). Die Dauer des Muschelkalks ist hier mit ≈ 4,8 Ma abgeschätzt: Komposit-Zyklen à ≈ 400 ka: 12 in den Folgen m1–m9, 5 in den Folgen s6–s7 (NITSCH et al., Kap. 6.1), Zyklen à ≈ 400 ka: 14 in den Folgen k1–k2 (STD 2016, NITSCH 2018), Zyklen à ≈ 100 ka: z3.1–s5.12 (KÄDING in MENNING & KÄDING 2013, STD 2016).

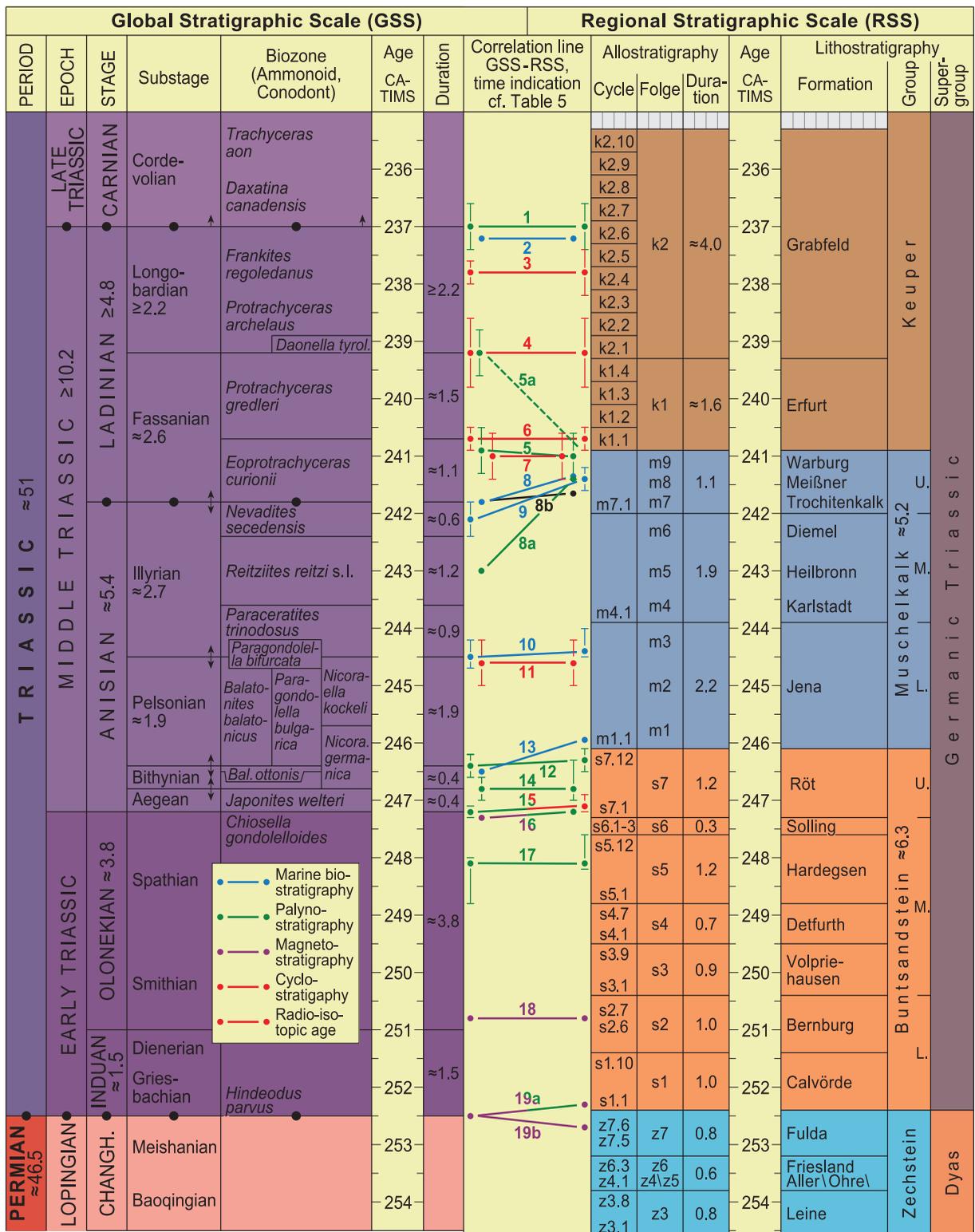


Abb. 9: Globale Geologische Zeitskala (GSS) für die Frühe und Mittlere Trias auf der Basis von CA-TIMS-RIA, der Integration von TIMS- und Multikorn-RIA und von Mächtigkeiten hemipelagischer Sedimente (identische GSS in Abb. 9, 10, 11). Die Dauer vom Zechstein bis zum Muschelkalk ist mit Zyklen à ≈ 100 ka abgeschätzt: Muschelkalk 52 Zyklen (≈ 5,2 Ma, schriftl. Mitt. K.-C. Käding 2015,), Buntsandstein 63 Zyklen (≈ 6,3 Ma, KÄDING in MENNING & KÄDING 2013), Zeit im Keuper: STD 2016, NITSCH (2018).

RSS) genutzt. Einige biostratigraphische Korrelationen leiden nach BRACK et al. (1999: 853) unter ungesicherter taxonomischer Stellung und in vielen Fällen ungünstiger Erhaltung von Fossilien. In Abfolgen der alpinen Mitteltrias sei die Korrelation fossilführender Intervalle nicht immer problemfrei.

Im Unteren Muschelkalk besteht ein Problem darin, dass *sich eine stratigraphische Abfolge der Balatonites-Funde mangels genügend horizontierten und spezifisch bestimmten Materials noch nicht klar definieren lässt* (Kap. 4.2: 180). Selbst mit Hilfe der Palynostratigraphie kann die tethyale bzw. alpine Gliederung im Germanischen Becken nur grob nachvollzogen werden, da auch Palynomorphe generell faziesgebunden sind. Deshalb darf nicht vorausgesetzt werden, dass eine Form an verschiedenen Orten gleichzeitig einsetzt. So erscheint nach C. Heunisch (schriftl. Mitt. 11/2018) z. B. der Formenkreis *Circumpolles* (Gymnosperme) im alpinen Bereich viel früher als im germanischen. Diese Diachronie existiert in Relation zu einem Korrelationsschema, das vor allem H. Kozur auf der Basis mariner Formen entwickelt und vertreten hat und das im Abschn. 6.4.12 hinterfragt und im Abschn. 6.4.13 partiell relativiert wird.

Die verwendeten Korrelationsmarken sind tabelliert und graphisch dargestellt (Tab. 8, Abb. 7, 8, 9). In den Graphiken begrenzen zwei parallele Korrelationslinien Zeitabschnitte, die in der RSS und GSS gleich lang sind. Dagegen zeigen divergierende Linien an, dass entweder eine Korrelation und/oder die Kalibrierung des Zeitabschnitts noch modifiziert werden sollte. Diese Integration von RSS und GSS ermöglicht es, Bereiche mit anscheinend konsistenter Korrelation und Kalibrierung von Bereichen zu unterscheiden, in denen entweder die Kalibrierung und/oder die Korrelation problematisch ist.

Aber selbst parallele Korrelationslinien bieten keine Gewähr dafür, dass Korrelation und Kalibrierung korrekt sind. Denn Fehler könnten sich auch zufällig kompensieren und eine Kongruenz zwischen GSS und RSS lediglich vortäuschen. Auf jeden Fall aber ist die zyklustratigraphische Kalibrierung der RSS dort von erheblichem Vorteil, wo es Korrelationslinien gibt und die GSS nicht RIA-kalibriert ist. Dort können die Zeitrelationen der RSS in die GSS projiziert und für deren Kalibrierung genutzt werden. Für die Kalibrierung der GSS spielen darüber hinaus aus Mächtigkeiten abgeleitete Zeitindikationen eine beträchtliche Rolle. So zeigen BRACK & RIEBER (1993) eine Relation zwischen Ammonitenzonen, die mächtigkeitsbasiert zu sein scheint, denn dort standen RIA noch nicht zur Verfügung. Diese Relation ähnelt erstaunlich unserer heutigen, die vor allem RIA-basiert ist.

Im Weiteren werden die Korrelationsmarken vorgestellt.

6.4.1 Ladinium-Karnium-Grenze in der Folge k2 (Grabfeld-Formation)

Einigkeit besteht über die Position der Ladinium-Karnium-Grenze in der Folge k2 (Grabfeld-Formation, Unterer Gipskeuper): Die untere Grabfeld-Formation gehört ins Ladinium (SCHEURING 1978: 94, BRACK et al. 1999). Die Stufengrenze liegt im palynologisch sterilen Abschnitt zwischen Weinsberg-Horizont (Bleiglanzbanken, unten) und Engelhofen-Horizont (oben) (SCHULZ & HEUNISCH 2005; vgl. Abb. 7, 8, 9: Korrelationslinie 1).

6.4.2 *Myophoria kefersteini okeni* in der Folge k2

Die spät-longobardisches | langobardisches Alter belegende Muschel *Myophoria kefersteini okeni* wurde im Weinsberg-Horizont der Mittleren Grabfeld-Formation nachgewiesen (URLICHS & TICHY 2000, URLICHS 2014). Entgegen früherer Annahme liegt damit die Grenze Ladinium-Karnium nicht nahe der Bleiglanzbank, wie in die STD 2002 übernommen, sondern höher wie in der STD 2016 (Abb. 7: Korrelationslinie 2).

6.4.3 RIA in der *F. regoledanus*-Zone in der Folge k2 (Grabfeld-Formation)

Eine RIA mit einem Alter von $237,77 \pm 0,14$ Ma aus der Fernazza-Formation ist biostratigraphisch nicht robust eingehängt, sondern lediglich nahe den *neumayri*- und *regoledanus*-Subzonen (MIETTO et al. 2012: 424). In Abb. 8 entspricht das Alter von 237,8 Ma der GSS etwa der Grenze zwischen den Zyklen k2.4 und k2.5 der RSS. Diese Korrelation wurde in die Abb. 7, 8 und 9 (Korrelationslinie 3) übernommen.

6.4.4 Fassanium-Longobardium | Langobardium- und Erfurt-Grabfeld-Grenze

Das Alter der Grenze Fassanium-Longobardium | Langobardium (Grenze *P. gredleri*-*P. archelaus*-Zone) ergibt sich aus dem CA-TIMS-Alter von $239,3 \pm 0,6$ Ma aus der Reifling-Formation vom Flexenpass in den Nördlichen Kalkalpen (BRÜHWILER et al. 2007: Fig. 3, 449; Abb. 5) und der RIA SEC-G (WOTZLAW et al. 2018). Ihre datierte vulkanoklastische Lage korrelieren BRÜHWILER et al. (2007) mit einem Tuff ca. 2 m unterhalb der Basis der *P. archelaus*-Zone in Bagolino. Naheliegender ist daneben auch eine Korrelation mit dem Tuff, mit dem in Bagolino die *P. archelaus*-Zone beginnt. Denn jeweils ca. 1,5 m über diesen Tuffen in Bagolino und am Flexenpass wurde die Muschel *Daonella tyrolensis* nachgewiesen (BRÜHWILER et al. 2007: Fig. 2). Nach SCHATZ (2004 in BRÜHWILER et al. 2007: 447) ist *D. tyrolensis* im untersten Teil der *P. archelaus*-Zone verbreitet. Da

die Nettoakkumulationsraten in beiden Profilen vergleichbar sind (Tab. 9), dürfte der datierte Tuff vom Flexenpass dem an der Basis der *P. archelaus*-Zone in Bagolino entsprechen. Nach den obigen RIA hat die Grenze Fassanium-Longobardium | Langobardium ein Alter von 239,2 Ma (Abb. 5). Dies entspricht etwa dem zyκλοstratigraphisch postulierten Grenzalter der Erfurt- und Grabfeld-Formation (Abb. 7, 8, 9: Korrelationslinie 4).

6.4.5 Fassanium-Longobardium | Langobardium- und Muschelkalk-Keuper-Grenze

Nach palynologischem Befund in der Bohrung Obernsees fällt die Fassanium-Longobardium | Langobardium-Grenze in etwa mit der Muschelkalk-Keuper-Grenze zusammen (VISSCHER et al. 1993: 146, Fig. 1; Abb. 7, 8, 9: Korrelationslinie 5a). Die Korrelationslinie 5a entspricht zwar dem Wortlaut von VISSCHER et al. (1993), ist aber irreführend, denn gemeint ist das Longobardium | Langobardium im Sinne von KRYSZYN (1983), das mit der *P. gredleri*-Zone beginnt (H. Visscher, schriftl. Mitt. 12.2.2019). Dagegen wird die von VISSCHER et al. (1993) gemeinte Korrelation durch die Linie 5 wiedergegeben, wobei beachtet ist, dass die *P. gredleri*-Zone von KRYSZYN (1983) nach schriftl. Mitt. von L. Krystyn vom 30.4.2019 (siehe auch MIETTO & MANFRIN 1995: Fig. 2) früher beginnt als die von BRACK & RIEBER (1993).

6.4.6 *E. curionii*-*P. gredleri*-Grenze in der Folge k1 (Erfurt-Formation)

Nach drei in sich konsistenten CA-TIMS-Altern in der frühen *P. gredleri*-Zone (WOTZLAW et al. 2018: 240,6–240,3 Ma) ist die Zonenuntergrenze hier mit \approx 240,7 Ma datiert (Abb. 5). In der zyκλοstratigraphisch kalibrierten RSS entspricht dieses Alter etwa der Grenze zwischen den Zyklen k1.1 und k1.2 (Erfurt-Formation, Abb. 7, 8, 9: Korrelationslinie 6).

6.4.7 Muschelkalk-Keuper-Grenze in der *E. curionii*-Zone

Das Alter von \approx 241,0 Ma für die Grenze der Gruppen Muschelkalk und Keuper ergibt sich aus der zyκλοstratigraphischen Kalibrierung der RSS. Die stratigraphische Position dieser Grenze in der späten *E. curionii*-Zone resultiert aus der Integration der unabhängig voneinander kalibrierten RSS und GSS (Abb. 8, 9: Korrelationslinie 7).

6.4.8 Grenze Anisium-Ladinium im Oberen Muschelkalk

Die aktuelle Anisium-Ladinium-Grenze wird innerhalb des Oberen Muschelkalks unterschiedlich gezogen (Abb. 6), u. a. weil der Leitammonit *Eoprotrachyceras curionii* im Muschelkalk bisher nicht gefunden wurde. Diese Grenze liegt hier an der Cycloidesbank und damit nahe der Grenzen der Folgen m8-m9 (Kap.

4.1, 4.2) und der Zyklen MO4-MO5 (Kap. 6.1: Tab. 4; Abb. 8: Korrelationslinie 8). Ähnlich sieht KOZUR (1999) die Grenze einmal unter der Cycloidesbank, einmal über der Cycloidesbank (BACHMANN & KOZUR 2004, KOZUR & BACHMANN 2005, 2008, KOZUR & WEEMS 2010; Abb. 6). Im Unterschied dazu führt eine Korrelation auf der Basis des Aussetzens von *Stellapollenites thiergartii* unter der Cycloidesbank und nahe der Obergrenze des traditionellen Anisiums (VISSCHER et al. 1993: 145–146) in Abb. 8 zu der stark diachronen Korrelationslinie 8a. Ebenfalls stark diachron verläuft die Korrelationslinie 8b auf der Basis von FRANZ et al. (2015: 4, Fig. 2, 5), welche die GSSP-Grenze Anisium-Ladinium in ihre Zone *philippii/robustus* (Folge m7b) legen: In Abb. 9 verläuft die Linie 8b infolge des dort sehr langen Mittleren Muschelkalks annähernd isochron.

6.4.9 *spinosus*-Zone in der *N. secedensis*-Zone

Aus der mittleren *spinosus*-Zone (Oberer Muschelkalk, Folge m8) von Weissach (Baden-Württemberg) wies URLICHS (1978: 5) ein Exemplar von *Protrachyceras recubariense* nach und korrelierte die *spinosus*-Zone mit der *E. curionii*-Zone der Alpen. Später stellten BRACK et al. (1999) diesen Fund zu *Nevadites* und korrelierten den Fundhorizont mit der *N. secedensis*-Zone (vgl. Kap. 4.2; Abb., 7, 8, 9: Korrelationslinie 9).

6.4.10 Pelsonium-Illyrium-Grenze im obersten Unteren Muschelkalk

Das Illyrium beginnt mit der *trinodosus*-Zone, deren Basis im höchsten Unteren Muschelkalk liegt (KOZUR 2003a, b). Etwas früher setzt der Conodont *Paragondolella bulgarica* an der Basis der Schaumkalkbank-Subformation aus, in welcher nur noch *Paragondolella bifurcata* vorkommt (KOZUR 1999: 718; Abb. 7, 8, 9: Korrelationslinie 10).

6.4.11 Numerisches Alter der Pelsonium-Illyrium-Grenze

Ihr Alter von $244,6 \pm 0,5$ Ma stufen OVTCHAROVA et al. (2006: 470 f.) in die *B. shoshonensis*-Zone und das späte Pelsonium ein. In der RSS ist das etwa die Grenze der Zyklen MU3-MU4 (Abb. 8: Korrelationslinie 11). Daraus wurde für die Pelsonium-Illyrium-Grenze ein Alter von ca. 244,5 Ma abgeleitet. Die Grenze könnte auch einige 100 ka jünger oder älter sein entsprechend des Vertrauensbereichs der RIA, der von GALFETTI et al. (2007: Fig. 2) auf $\pm 0,36$ Ma reduziert wurde.

6.4.12 Bithynium-Pelsonium-Grenze in der späten Folge s7 (Röt-Formation)

Die Unterstufen Aegaeum und Bithynium haben zusammen eine Dauer von maximal 0,8 Ma, sofern (1) die RIA aus dem frühesten Pelsonium (LEHRMANN et

al. 2006: 246,8 +0,4/-0,5 Ma) zugrunde gelegt und ihr Vertrauensbereich hin zu einer maximalen Dauer der Unterstufen ausgeschöpft wird (Abb. 5). Indem außerdem (2) das Röt mit 1,2 Ma (KÄDING in MENNING & KÄDING 2013) bzw. 1,5 Ma (Kap. 6.1) angesetzt wird und davon (3) gut 0,2 Ma in das Olenekium fallen (s. Abschn. 6.4.14, Abb. 1), beginnt das Pelsonium in der späten Folge s7 (Röt-Formation). Im Unterschied dazu nehmen KOZUR & WEEMS (2010: 329) an, dass die obige RIA nicht in das früheste Pelsonium gehört, sondern in das untere bis mittlere Bithynium.

Auch BRUGMAN (1986: 65, Table VIII) sieht die Basis des Pelsoniums im späten Röt: *Phase Röt-3* [Myophorienschichten] *is tentatively considered to characterize the Early-Late Anisian transition* [Bithynian-Pelsonian] *in the Germanic Basin. ... At least in Franken (Table IX) Cristianisporites triangulatus shows its first appearance within phase Röt-3. This element is known to occur in a fauna-controlled Pelsonian sequence in Roumania* (ANTONESCU et al. 1976; Abb. 7, 8, 9; Korrelationslinie 12).

Dagegen kommt KOZUR (1999: 718) zu einer wesentlich höher liegenden Bithynium-Pelsonium-Grenze, die er in einem 5–6 m mächtigen Bereich im Hangenden der Oolithbank-Subformation verortet. Nach ihm ist der untere Wellenkalk durch das Vorkommen von *Nicoraella germanica* (KOZUR) ohne *N. kockeli* (TATGE) charakterisiert und diese „Conodonten-Assoziation“ sei weltweit charakteristisch für das Bithynium.

Dazu ist zu fragen bzw. zu bemerken: (1) Inwieweit tritt *Nicoraella germanica* in der Typuslokalität des Bithyniums in der Türkei auf? In welchem Teil des dortigen Profils kommt die Form vor? Sollte sie dort nicht vorkommen, welchen Wert hätte dann die Aussage von H. Kozur? (2) Kann das Bithynium überhaupt weltweit korreliert werden? Nach Tozer sind Bithynium und Pelsonium nicht zu unterscheiden (vgl. Abschn. 2.1). (3) Inwieweit kommen *N. kockeli* und *N. germanica*, die nach Kozur das Pelsonium charakterisieren, in dessen Typuslokalität in Ungarn vor? (4) Mit welchen Formen sind das Bithynium in der Türkei und das Pelsonium in Ungarn definiert und inwieweit kommen diese in Deutschland vor? (5) Könnte *Balatonites balatonicus* verzögert nach Deutschland eingewandert sein? Da diese Form wohl > 1,5 Ma lang lebte (Abb. 7, 8, 9), ist ein faziell bedingter unterschiedlicher FOD in beiden Gebieten kaum auszuschließen. (6) Inwieweit gibt es hier phylogenetische Reihen? (7) Auf das Schema der Conodontenzonen von Kozur und seine Korrelation der Conodontenzonen mit den Substufen beziehen sich nahezu alle Folgearbeiten. Ist das Schema jemals auf seine Konsistenz hin überprüft worden? (8) Conodonten konnten nach Mitteleuropa erst einwandern,

nachdem das Muschelkalkmeer dort hinreichend ingegrediert war und nicht bereits zur Zeit des vorwiegend kontinentalen mittleren Röt. Wenn ein Conodont wie *Nicoraella germanica* in der Tethys und in Mitteleuropa anscheinend leicht diachron einsetzt (Kap. 4.3: 199) kann dann ein diachrones Einsetzen des Ammoniten *Balatonites ottonis* im Prezzo-Kalkstein und im unteren Wellenkalk ausgeschlossen werden (s. Abschn. 6.4.13, 7.1, Abb. 10, 11)?

Hier wird eine potenzielle Schwäche der marinen Biostratigraphie offenbar, nämlich das letztlich nicht auszuschließende diachrone Einsetzen milieuhängiger Formen im Fall einer großen Transgression wie der des Muschelkalks. Hier haben die weniger faziesabhängige Palynostratigraphie und die faziesunabhängige radio-isotopische Altersbestimmung in Kombination mit der zyklustratigraphischen Kalibrierung die Aufgabe, die Korrelation mithilfe von Ammoniten, Conodonten und Muscheln zu verifizieren und möglicherweise eine Alternative aufzuzeigen.

6.4.13 *Balatonites ottonis*: diachron im Übergangsbereich Bithynium/Pelsonium und in der Folge m1 (Jena-Formation)

Der Ammonit *B. ottonis* ist in Mitteleuropa erstmals aus dem untersten Cephalopodenhorizont des Unteren Wellenkalks belegt (Kap. 4.2: 184), der im unteren, aber nicht im alleruntersten Wellenkalk liegt. In den Südalpen erscheint er nach MONNET et al. (2008: Fig. 4, 17) erst im allerobersten Angolo-Kalkstein, (vgl. Abschn. 7.1, Abb. 10, 11) in dem nur kurzen Übergangsbereich (drowning succession) zum tiefermarinen Prezzo-Kalkstein, also noch nicht im tieferen flachmarinen Angolo-Kalkstein. In beiden Gebieten bevorzugte die Form somit mittelflaches Wasser und scheint damit milieuhängig zu sein.

Die folgenden Argumente sind konsistent und sprechen für ein diachrones Erscheinen (FOD) von *B. ottonis* zunächst in den Südalpen im Übergangsbereich Bithynium/Pelsonium und später in Mitteleuropa im frühen Pelsonium (Abb. 7, 8, 9; Korrelationslinie 13): (1) Die Untergrenze des Aegaeums liegt gut 0,2 Ma über der Basis der Folge s7 (Abschn. 6.4.16, Abb. 10). (2) Das Pelsonium beginnt palynologisch in der späten Folge s7 im Liegenden der Myophorienschichten (BRUGMAN 1986, Abschn. 6.4.14, Abb. 7, 8, 9; Korrelationslinie 11). (3) Die Folge s7 (Röt-Formation) dauerte zyklustratigraphisch ca. 1,2 Ma oder ca. 1,5 Ma (Abschn. 5.2). (4) Der Umfang von Aegaeum und Bithynium ist nach den RIA max. 0,8 Ma (Abschn. 5.1.2.2). Unter den speziellen transgressiven Bedingungen im Übergangsbereich vom Buntsandstein zum Muschelkalk und vom flachmarinen Angolo-Kalkstein zum tiefermarinen Prezzo-Kalkstein könn-

te es sein, dass *B. ottonis* in den Südalpen im mittelfachen Wasser lebend via Schlesisch-Mährische Pforte und Niederschlesien nach Südost-Brandenburg und Sachsen-Anhalt und möglicherweise sogar bis nach Thüringen einwanderte.

6.4.14 Aegaeum-Bithynium-Grenze in der mittleren Folge s7 (Röt-Formation)

Nach palynologischen Ergebnissen und RIA liegt die Grenze Aegaeum-Bithynium im Röt. BRUGMAN (1986: 64) schreibt dazu, dass sie entgegen DOCKTER et al. (1980) nicht an der Grenze Röt-Wellenkalk sei, sondern beträchtlich tiefer im Röt-2 [Pelitröt] sein dürfte, ohne dass bisher eine genaue Position angegeben werden könne (vgl. Abb. 7, 8, 9: Korrelationslinie 14).

6.4.15 Olenekium-Anisium-Grenze in der frühen Folge s7 (Röt-Formation)

Der GSSP für die Olenekium-Anisium-Grenze dürfte mit dem FOD des Conodonten *Chiosella timorensis* oder des Ammoniten *Japonites welteri* festgesetzt werden. Favorit ist das Profil von Desli Caira (Rumänien, Dobrudscha). Diese potenzielle globale Grenze liegt wahrscheinlich im unteren Teil des Zyklus s7.3 im Röt (Abb. 10). Grundlage dafür sind die palynostratigraphischen Ergebnisse von BRUGMAN (1986) und VISSCHER et al. (1993), die RIA von LEHRMANN et al. (2006), die zyklustratigraphischen Kalibrierungen von KÄDING in MENNING & KÄDING 2013 und nach Kap. 6.1 sowie die magnetostratigraphische Korrelation zwischen Mitteleuropa und der Insel Chios (Abb. 1; Abb. 7, 8, 9: Korrelationslinie 15).

Auch KOZUR (1975) sieht die Grenze zunächst im frühen Röt. Später verlegen KOZUR (1999: 717), BACHMANN & KOZUR (2004), KOZUR & BACHMANN (2005, 2008) und KOZUR & WEEMS (2010) die Grenze Olenekium-Anisium in die obere Solling-Formation (späte Folge s6, Abb. 6). Diese Position ist magnetostratigraphisch problematisch, weil die mittlere und späte Folge s6 invers magnetisiert ist und in die inverse Zone s10r gehört (MENNING & KÄDING 2013), die nicht mit der normal polarisierten Zone C+ von Chios, in welche die Grenze Olenekium-Anisium fällt (MUTTONI et al. 1994), korrelieren kann (Abb. 1). Die Korrelation in Abb. 1 spiegelt die generelle Situation wider, während im Profil von Kçira (MUTTONI et al. 1996a) zusätzlich zwei geringmächtige Magnetozone hinzukommen, die an anderen Orten oft schwer nachzuweisen sein dürften (G. Muttoni, mdl. Mitt. 4.7.2019).

6.4.16 Myophoriendolomite (frühe Folge s7, Röt-Formation) im spätesten Olenekium

Die Myophoriendolomite stellt KÄDING in seinen späten Zyklus s7.2 (frühe Folge s7, Röt-Formation,

in SUBKOMMISSION PERM-TRIAS 2011: Tab. 4): Palynologisch gehören sie in das späteste Olenekium (BRUGMAN 1986: 62; Abb. 7, 8, 9: Korrelationslinie 16). Auch KOZUR (1975: 59) konstatiert, dass in den Myophoriendolomiten reiche Faunen des oberen Olenekiums gefunden wurden. Magnetostratigraphisch passt hierzu, dass die Grenze Olenekium-Anisium in die normal magnetisierte Zone C+ von Chios fällt (MUTTONI et al. 1994) und auch der Zyklus s7.2 mit den Myophoriendolomiten normal magnetisiert ist (SZURLIES 2007, MENNING & KÄDING 2013). Die Myophoriendolomite liegen leicht über der Basis der Magnetozone s11n (Abb. 1).

6.4.17 Späte Folge s5 (Hardeggen-Formation) im späten Olenekium (mittleres Spathium)

Eine verlässliche Zeitmarke ist nach C. Heunisch (schriftl. Mitt. 15.12.2004) die kurzlebige Spore *Cycloverrutriletes presselensis*, die in der späten Folge s5 (HEUNISCH 1999: 215) und im mittleren Spathium (FJALKOWSKA-MADER 1999: Table 3) auftritt. Entsprechend dieser Reichweiten sind in den Abb. 7, 8, 9 für die Korrelationslinie 17 Konfidenzbereiche angegeben, die eine isochrone Korrelation in Form einer horizontalen Linie möglich erscheinen lassen.

6.4.18 Indusium-Olenekium-Grenze in der Folge s2 (Bernburg-Formation)

Die Stufengrenze Indusium-Olenekium fällt nach der Integration folgender Daten in die Folge s2 (Bernburg-Formation): Die Folgen s1 und s2 bestehen aus je 10 Zyklen à 100 ka. Das Indusium dauert nach einer RIA von OVTCHAROVA et al. (2006: 250,6 ± 0,5 Ma, frühes Spathium) ≤ 2 Ma. Die Grenzen Zechstein-Buntsandstein und Perm-Trias liegen nahe beieinander (Abschn. 6.4.19). Die obige RIA bekräftigt die magnetostratigraphische Korrelation, nach der die Grenze Indusium-Olenekium etwa mit der Grenze der Zyklen s2.6-s2.7 korreliert (MENNING et al. 2005: Abb. 1; Abb. 7, 8, 9: Korrelationslinie 18).

6.4.19 Grenzen Perm-Trias und Zechstein-Buntsandstein

Die Grenze Zechstein-Buntsandstein liegt in der GSS im spätesten Perm oder in der frühesten Trias. Werden für die Folge z7 (Fulda-Formation) zwei Zyklen und für Folge s1 (Calvörde-Formation) zehn Zyklen à 100 ka angenommen (SZURLIES 2001: 105, Abb. 64, 65, 68) und GSS und RSS magnetostratigraphisch korreliert, so liegt die Basis des Buntsandsteins im höchsten Perm (vgl. SZURLIES in MENNING et al. 2005; Abb. 8: Korrelationslinie 19a). Zu dieser Grenzziehung kamen auch ECKE (1986) und KOZUR (1989), die die Perm-Trias-Grenze an die Obergrenze des Graubankbereichs im frühen Zyklus s1.2 legten. Werden

für die Folge z7 acht Zyklen angesetzt (KÄDING, in MENNING et al. 2005), so kann die Basis des Buntsandsteins auch in der frühesten Trias liegen (Abb. 9: Korrelationslinie 19b).

Das Alter der Perm-Trias-Grenze von $251,902 \pm 0,024$ Ma (ICS 2018/8, BARESEL et al. 2016: „Bayesian age-depth modelling“) ist inkonsistent mit unserer integrativen Zeitskala (Abb. 7, 8, 9), die das bewährte Alter von 252,5 Ma (u. a. MENNING et al. 2005, STD 2016) nutzt, das mit der zyκλοstratigraphischen Kalibrierung konsistent ist.

6.5 Fazit

Die biostratigraphischen Korrelationen zwischen der RSS und GSS sind nach dem Vorkommen der Formen eher im flachen Wasser (hellblau), eher im tiefen Wasser (dunkelblau) und nach Sporomorphen (grün) differenziert (Abb. 7, 8, 9, Tab. 8). Die roten Linien verbinden Punkte, die in der GSS und RSS dasselbe numerische Alter haben, wobei die Alter in der GSS auf RIA und Mächtigkeiten (Abschn. 5.1) und in der RSS auf sedimentären Zyklen basieren (Abschn. 5.2). Lila Linien zeigen magnetostratigraphische Korrelationen. Parallele und zugleich horizontale Linien stehen für eine konsistente Datenintegration zwischen RSS und GSS, divergierende Linien für Probleme. Dargestellt sind bei gleichbleibender GSS drei Korrelationsschemata, die sich durch ihre unterschiedlich kalibrierten RSS mit demzufolge unterschiedlich verlaufenden Korrelationslinien unterscheiden (Abb. 7, 8, 9).

Integration A (Abb. 7) – Die RSS entspricht der der STD 2016. Die im Oberen Muschelkalk und Keuper schräg nach rechts oben weisenden Korrelationslinien zeigen an, dass der Muschelkalk in der STD 2016 mit 7 Ma zu lang bemessen ist. Im Unterschied dazu belegen die annähernd horizontalen und parallelen Linien im Buntsandstein, dass dessen zyκλοstratigraphische Kalibrierung konsistent ist mit den globalen RIA (Abb. 5).

Integration B (Abb. 8) – Die Kalibrierung der Folgen z3 bis s5 basiert auf KÄDING (in MENNING & KÄDING 2013), die der Folgen s6 bis m9 auf den Zyklen von Kap. 6.1 und die der Folgen k1 und k2 auf NITSCH (2018: 190) und NITSCH et al. (2005: Tab. 3). Die meisten Korrelationslinien verlaufen parallel bzw. nahezu parallel und nahezu horizontal, was für die Konsistenz des Korrelationsschemas spricht. Abweichend davon weist die schräge Linie 12 auf das hypothetisch diachrone Einsetzen des Ammoniten *Balatonites ottonis* hin. Die gestrichelte, stark diachrone Linie 5a steht für eine Scheinkorrelation, die zwar dem Wortlaut in der Literatur entspricht,

nicht aber die Definition der Einheiten hinterfragt: VISSCHER et al. (1993: 146, Fig. 1) meinten nämlich nicht das Longobardium | Langobardium, das wie hier mit der *P. archelaus*-Zone beginnt, sondern das Longobardium | Langobardium im Sinne von KRYSSTYN (1983), das mit der *P. gredleri*-Zone einsetzt und in welcher die charakteristische Pollenart *Heliosaccus dimorphus* erscheint (H. Visscher, schriftl. Mitt. 12.2.2019). Die Linie 5 zeigt die von VISSCHER et al. (1993: 146, Fig. 1) gemeinte Korrelation. Die Korrelationslinie 8 zeigt die Korrelation auf der Basis von Ammoniten und Conodonten. Zu den Linien 8a und 8b siehe Abschn. 6.4.8. Die numerischen Alter von GSS und RSS stützen und kontrollieren sich gegenseitig; sie sind positiv rückgekoppelt. Die regionalen und globalen Zeitindikationen sind in der dargestellten integrierten Form untereinander weit hin konsistent.

Integration C (Abb. 9) – Die Kalibrierung der Folgen z3 bis s7 basiert auf KÄDING (in MENNING & KÄDING 2013: 195–199), die der Folgen m1 bis m6 auf K.-C. Käding (schriftl. Mitt. 2015), die der Folgen m7 bis m9 auf KÄDING et al., Kap. 7.2, die der Folgen k1 auf NITSCH (2018: 190) und k2 auf NITSCH et al. (2005: Tab. 3). Die Korrelationslinien verlaufen wie bei der Integration B überwiegend parallel bzw. nahezu parallel und nahezu horizontal. Dies spricht für die weitgehende Konsistenz auch dieses Korrelationsschemas. Auch hier widerspiegelt die Linie 13 das hypothetisch diachrone Einsetzen des Ammoniten *Balatonites ottonis*, die stark diachrone Linie 5a lediglich eine Scheinkorrelation und die Linie 5 die von VISSCHER et al. (1993) gemeinte Korrelation. Im Unterschied zur Integration B sind die Linien 7 und 8 leicht diachron und die Linie 8b isochron. Ursache dafür ist der mit 1,9 Ma sehr lang anmutende Mittlere Muschelkalk und der mit nur 1,1 Ma sehr kurz erscheinende Obere Muschelkalk.

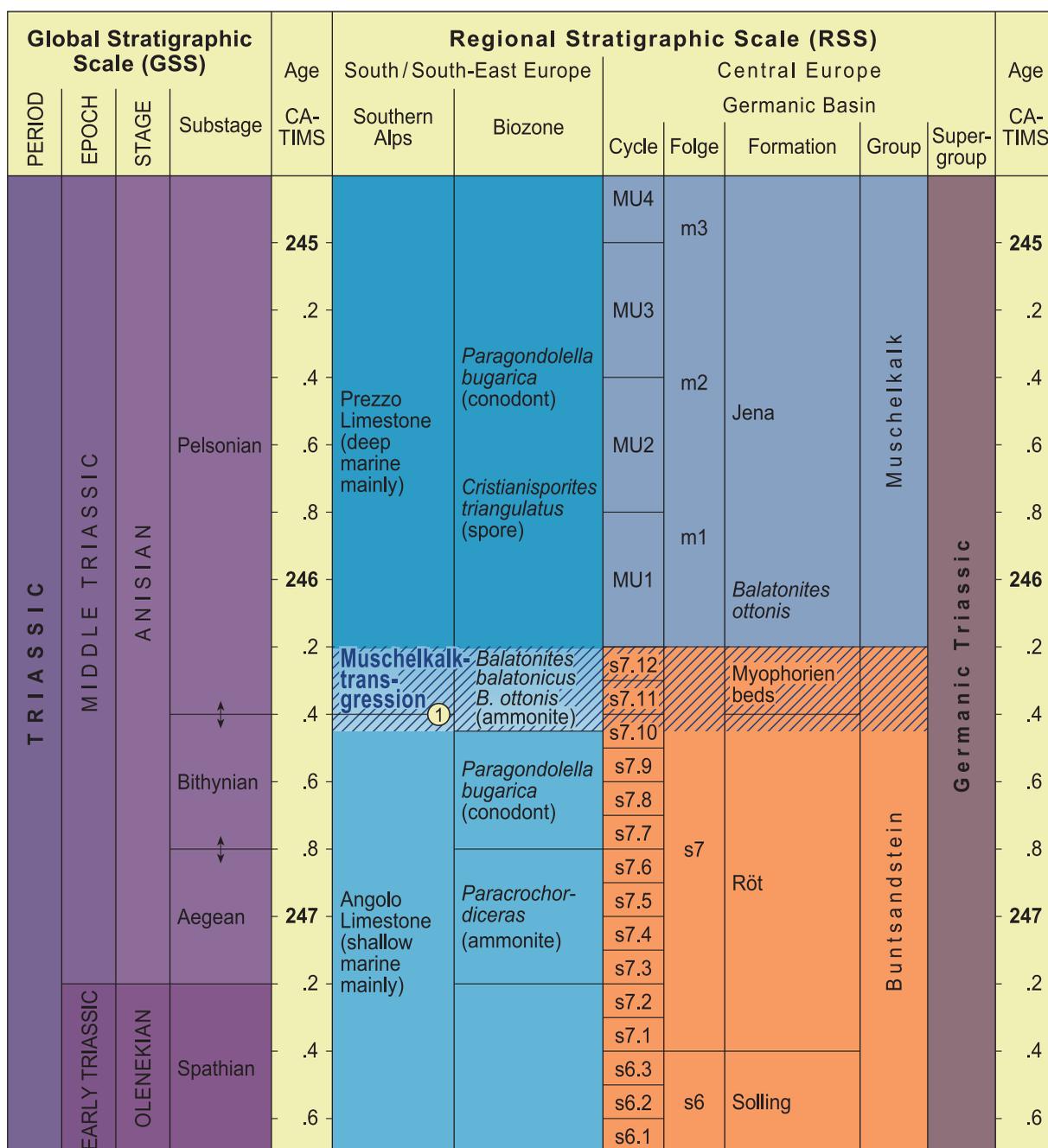
7. Transgression, Akkumulation, Milankovitch-Zyklizität

7.1 Zur Muschelkalktransgression und zum Muschelkalk in den Südalpen

Dem vorliegenden Versuch zum Nachweis der Muschelkalktransgression in den Alpen liegen verschiedenste, hier integrierte Informationen wie globale RIA, zyκλοstratigraphische Kalibrierungen und persönliche Mitteilungen zugrunde (Abb. 8, 9). (1) Zu den ursprünglichen Substufen des Anisiums, Pelsonium und Illyrium, kamen die Substufen Aegaeum und Bithynium erst spät hinzu (ASSERETO 1974; Abschn. 2.1). Letztere sind kürzer als weithin angenommen und auf das Röt beschränkt (Abb. 5). (2) Die Muschelkalktransgression

beginnt mit einem eustatischen Meeresspiegelanstieg, der in den Südalpen zu einer Vertiefung des marinen Milieus führt („drowning succession“, schriftl. Mitt. P. Brack 16.3.2006, MONNET et al. 2008), während in Mitteleuropa kontinentales Milieu weiterhin vorherrscht; nachhaltig dringt das Meer hierher erst im späten Röt vor. (3) Das vorwiegend kontinentale Röt und der partiell gleichaltrige flachmarine Angolo-Kalkstein sind wegen ihrer unterschiedlichen Indexfossilien schwer zu parallelisieren. Am ehesten eignen sich dafür Palynomorphe (Punkt 11); doch auch ihr Vorkommen wird durch Klima und Fazies beeinflusst. (4) In Relation zu den Einheiten des Muschelkalks wurden die

tethyalen Substufen und Gesteine der Mitteltrias lange deutlich höher eingestuft als heute. Die Korrelation zwischen beiden Gebieten wurde erst spät sukzessive geändert (Abb. 6). Auch war und ist die Zuweisung von Schichten zu Substufen variabel. So stuft PIA (1930) den Prezzo-Kalkstein zum größten Teil ins „Unterillyr“ und nicht wie heute zumeist ins Pelsonium ein. (5) In ihrer globalen Synthese der Meeresspiegelschwankungen setzen HAQ et al. (1988: Fig. 17) den Muschelkalk mit der Mittleren Trias gleich. Mitursache für diese Generalisierung könnte der bisher fehlende Nachweis der Muschelkalktransgression in den Südalpen sein. (6) Doch wahrscheinlich hat sie in den Südalpen eine



① "Drowning succession" (Brack, writt. comm. 2006)

Abb. 10: Die Muschelkalktransgression in Mitteleuropa und den Südalpen

Spur hinterlassen. So folgt im Profil des Monte Corona auf den flachmarinen/neritischen Angolo-Kalkstein der pelagische/tiefmarine Prezzo-Kalkstein. Die von BRACK et al. (1999: Fig. 3) mit einer Linie markierte Grenze zwischen beiden dürfte in etwa den Beginn der Muschelkalktransgression widerspiegeln, die sich in den Südalpen durch eine signifikante Vertiefung des Ablagerungsmilieus bemerkbar macht (drowning succession, MONNET et al. 2008). Die weitere Vertiefung des Beckens erfolgte anschließend tektonisch. MONNET et al. (2008: 81, 82) sehen den Prezzo-Kalkstein dagegen als Resultat einer lediglich regionalen Transgression (Prezzo-Transgression) und dann gleichfalls in einer raschen regionalen Vertiefung des Beckens. (7) Die Basis der *B. balatonicus*-Zone (Abschn. 2.1) liegt im obersten Angolo-Kalkstein, denn *Balatonites* gr. *B. ottonis* wurde 5–6 m unter dem Übergang vom oberen Angolo- zum Prezzo-Kalkstein gefunden (MONNET et al. 2008: 66; Abb. 10). Schon BITTNER (1881, in MONNET et al. 2008: 82) hat aus dem obersten Angolo-Kalkstein von *Balatonites balatonicus*, *Acrochordiceras* ... berichtet. Dies legt nahe, dass *B. ottonis* und *B. balatonicus* weder im ganz flachen Wasser, in dem der Angolo-Kalkstein im Wesentlichen akkumulierte, noch im tiefen Wasser, in dem große Teile des Prezzo-Kalksteins sedimentierten, lebten; der große mittlere Teil des Prezzo-Kalksteins ist frei von Ammonoideen (MONNET et al. 2008: Fig. 17). Das für die Ammonoideen günstige mittelfache Milieu dürfte mit der Muschelkalktransgression migriert sein. Infolgedessen erschienen *B. ottonis* und *B. balatonicus* in Süd- und Südost-Europa früher als in Mitteleuropa (Abb. 10, 11, Abschn. 6.4.12). (8) Zur Reichweite von *B. ottonis* ist zu sagen, dass die

Form am Monte Corona in der „drowning succession“ vorkommt (P. Brack, schriftl. Mitt. 16.3.2006), einer Abfolge aus wenigen Metern knolligem (nodularem) Kalkstein am Top der Plattform-Karbonate des Angolo-Kalksteins. Von dort hätten BALINI et al. (1993) von *Balatonites* sp. berichtet und von einem einzelnen Fragment mit Affinitäten zu *B. balatonicus* (P. Brack, schriftl. Mitt. 6.2.2019). Dagegen sind die Funde in Mitteleuropa nicht gut horizontiert (Kap. 4.2), so dass keine verlässliche Aussage zum Grad der Diachronie möglich ist. (9) Die Muschelkalktransgression beginnt in der Tethys im Grenzbereich Bithynium/Pelsonium und erreicht über die Schlesisch-Mährische Pforte nach einigen 100 ka Unterfranken via Niederschlesien, Niederlausitz und Thüringer Senke. Ihre Dauer dürfte mindestens 200 ka, könnte aber auch 400 ka sein (auf der Basis der Zyklusstratigraphie von KÄDING in MENNING & KÄDING 2013; Abb. 10, 9). Nach der Zyklusstratigraphie in Kap. 6.1 ist sie bis zu 800 ka lang (Abb. 8). Entsprechend kann für die Muschelkalktransgression ein Zeitraum von gut 200 ka bis maximal 800 ka veranschlagt werden. (10) Vorboten der Muschelkalktransgression in Mitteleuropa sind die zunehmende Humidität, auf die u. a. KURZE & KLEDITZSCH (2018) aus dem im Laufe des Buntsandsteins abnehmenden Gehalt von Apatit in der Schwermineralfraktion von Sandsteinen schließen: In den Folgen s1, s2 und s3 ist der Anteil hoch, nimmt danach ab und ist in der Folge s6 sehr gering (KURZE & KLEDITZSCH 2018: Abb. 6: Fraktion 63–100 µm). Auch werden ab der frühen Folge s7 (Röt) Dolomite, Anhydrite und Steinsalze abgeschieden, deren Bestandteile aus Meerwasser stammen und die nicht aus dem Zechstein umgelagert worden sind (TRUSHEIM 1971). (11) Die

durch RIA indizierte kurze Dauer der Unterstufen Aegaeum und Bithynium (Abschn. 5.1.2.2) ist grundlegend für die vorstehende Transgressionshypothese. Sie wird gestützt durch eine Korrelation mit Hilfe der faziesübergreifenden Palynomorphen, nach der das Pelsonium im Röt beginnt (VISSCHER et al. 1993), und die Informationen von P. Brack über die Ammonoidea in der „drowning succession“ (Punkt 8). Damit ist ein Zusammenhang zwischen dem Beginn der Muschelkalktransgression und dem Wechsel von der Flachwasser- zur Tiefwasserfazies in den Südalpen

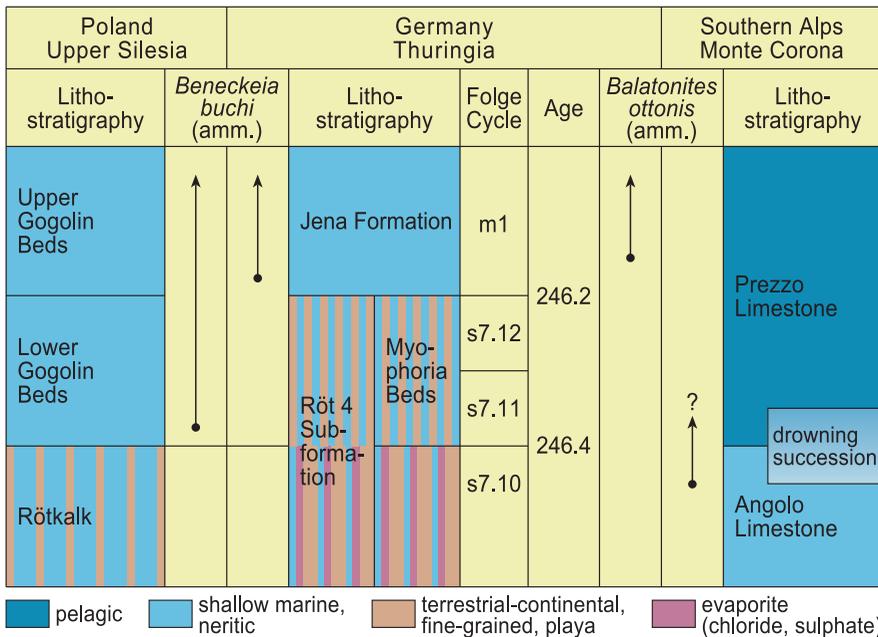


Abb. 11: Diachrones erstes Vorkommen (FOD) der Ammonoideen *Beneckeia buchi* und *Balatonites ottonis* in Schlesien, Deutschland und den Südalpen

naheliegend. (12) Das Vorstehende zeigt, welchen Spielraum die Biostratigraphie bei der Korrelation verschiedener Faziesbereiche bieten kann. Deshalb bedarf es bei deutlichen Meeresspiegelschwankungen und drastischen Faziesänderungen weiterer Zeitindikationen, um den potenziellen Einfluss von marinen „Späteinwanderern“ auf biostratigraphische Korrelationen abzuschätzen. Die diachrone Korrelationslinie 13 in den Abb. 7, 8, 9 legt nahe, dass *Balatonites ottonis* ein Späteinwanderer in das Germanische Becken ist. Potenzielle Späteinwanderer könnten weitere Formen sein, die im untersten Cephalopodenhorizont des Muschelkalks vorkommen (vgl. Kap. 4.2: 184). In diesem Sinn wird in Kap. 4.2.: Abschn. 3.1 auch bemerkt, dass im Oberen Muschelkalk die Ceratiten nicht mit der ersten Transgression ins Mitteleuropäische Becken einwanderten (vgl. URLICHS & MUNDLOS 1985), sondern später. (13) „Späteinwanderer“ ins Germanische Becken könnten zugleich „Frühauswanderer“ bzw. „Verdrängte“ aus Teilen der flachen Tethys sein, insbesondere wenn sie an ein Milieu mit optimaler Wassertiefe gebunden sind.

7.2 Nettoakkumulationsraten im Muschelkalk und in der Mittleren Trias

In Nordost-Deutschland ist die mittlere Nettoakkumulationsrate des Muschelkalks ≈ 75 m/Ma, wobei sie im Mittleren Muschelkalk mit ≈ 160 m/Ma mehr als doppelt so hoch ist wie im Unteren und Oberen Muschelkalk (MENNING 1991: 813; Tab. 9). Damit ist sie deutlich kleiner als im späten Rotliegend, Zechstein und Buntsandstein des Mitteleu-

ropäischen Beckens (≈ 200 m/Ma), weshalb MENNING (1991) das Hauptabsenkungsstadium mit dem Buntsandstein enden lässt. Im sehr lückenhaften Keuper sinkt die mittlere Rate auf nur noch ≈ 20 m/Ma.

Sehr unterschiedliche Akkumulationsraten charakterisieren die Südalpen. In den hemipelagischen Beckensedimenten der Buchenstein-Formation von Seceda und Bagolino ist die Nettoakkumulationsrate der Hintergrundsedimentation (ohne Turbidite und Tuffe und auf der Grundlage der hier entwickelten Zeitskala) nur etwa 8 m/Ma. Dagegen ist sie mit 19 m/Ma gut doppelt so hoch auf der Basis von zwei

Autoren	Region Aufschluss Lithostratigraphie	Allostratigraphie Biostratigraphie Radio-isotopische Altersbestimmung (RIA)			Mächtigkeit \approx m	Dauer \approx Ma diese Arbeit	Nettoakkum.-rate \approx m/Ma	
		Bunt-sand-	Muschelkalk					
Mitteleuropäisches Becken / Germanisches Becken								
			mu	mm	mo			
MENNING 1991: Fig. 2	Nordostdeutschland, Beckenzentrum	-	m1-9			370	4,8	75
		-	-	-	m7-9	120	2,3	50
		-	-	m4-6	-	130	1,1	120
		-	m1-3	-	-	120	1,4	85
		s6-s7	-	-	-	360	1,5	240
		s6-s7	-	-	-	360	2,0	180
GAERTNER 1993: 58	Nordwestdeutschland	-	m1-9			200	4,8	40
						300	4,8	60
Alpen: Beckensedimente								
BRACK & RIEBER 1993: 458	Norditalien, Südalpen, Buchenstein- Formation ("Knollenkalke")	späte <i>R. reitzi</i> -Zone – frühe <i>P. gredleri</i> -Zone			-	-	4,5-10	
MUNDIL et al. 1996: 145					-	-	3-10	
MAURER 2003: Fig. 5.2	Südalpen Seceda-Bohrkern Buchenstein-Fm. mit Turbiditen (part)	98-45 m, mittlere <i>R. reitzi</i> -Zone – späte <i>P. gredleri</i> -Zone			53	3,8	14	
		92-64 m, späte <i>R. reitzi</i> -Zone – frühe <i>P. gredleri</i> Zone			28	2,7	10	
MENNING, diese Arbeit	Südalpen, Seceda- Kern (part), Buchen- st.-Fm. ohne Turbid.	92-64 m, späte <i>R. reitzi</i> -Zone – frühe <i>P. gredleri</i> Zone 67 Zyklen à 40 ka			21	2,7	8	
BRACK et al. 2007: Fig. 11	Bagolino Buchenstein- Formation	späte <i>R. reitzi</i> -Zone – frühe/mittl. <i>P. archelaus</i> -Zone			33,7	4,0	8	
BRÜHWILER et al. 2007: Fig. 2		späte <i>R. reitzi</i> -Zone – mittlere <i>P. archelaus</i> -Zone			33,5	4,0	8	
WOTZLAW et al. 2018: 82	Südalpen, Seceda, Buchenst.-Fm. ohne Turbidite und Tuffe	SEC-B (240,576 \pm 0,042 Ma) – SEC-D (241,705 \pm 0,045 Ma): 61 Zyklen à 18,5 ka			21	1,13 Auto- ren	19	
BRÜHWILER et al. 2007: Fig. 2	Nördliche Kalkalpen, Reifling-Formation	etwa späte <i>R. reitzi</i> -Zone – mittlere <i>P. archelaus</i> Zone			54	4,4	12	
						4,0	13	
Südalpen: Karbonatplattformen								
GOLDHAMMER et al. 1990, HINNOV & GOLD. 1991: Fig. 2	Latemar	Obere Zyklische Fazies (UCF) Mittlere Tepee-Fazies (MTF) Untere Zyklische Fazies (LCF) Untere Plattform-Fazies (LPF)			775	12 Auto- ren	65	
BRACK et al. 1996: figs. 4, 5		LPF, LCF, MTF, UCF			460	13,2	35	
EGENHOFF et al. 1999: 896		LCF, MTF, UCF, UTF (Obere Tepee-Fazies)			700	2,7	260	
					420	1,8	230	
MUNDIL et al. 2003: Fig. 2		LCF, MTF, UCF, UTF			470	2-4,7	100- 235	
PRETO 2003: Fig. 3, 10		LTF, LCF, MTF, UCF, UTF			470	1,6	290	
ZÜHLKE 2003: III- 1, figs. III-7, III-3, ZÜ. et al. 2003a		späteste <i>R. reitzi</i> - – <i>N. secedensis</i> -Zone, LCF, MTF, UCF, UTF			540	12 Autor.	45	
KENT et al. 2004: Fig. 3		LCF, MTF, UCF			460	2,8	165	
MEYERS 2008: 320, Fig. 1d		statistical approach: "average spectral misfit" (ASM)			390	0,35 0,44	1100 890	
MENNING, diese Arbeit		späte <i>R. reitzi</i> - – späte <i>E. curionii</i> - Z., LTF, LCF, MTF, UCF, UTF			460	2,3	200	
BRACK et al. 2007: 327	Cernera Bivera/Clapsavon	späte <i>R. reitzi</i> -Zone			-	0,5- 1,0	≥ 500	

Tab. 9: Netto-Akkumulationsraten im Muschelkalk und in der Mittleren Trias der Alpen

neuen RIA und der Annahme, dass die Zyklen Präzessionszyklen mit einer Dauer von $18,5 \pm 2,1$ ka sind (WOTZLAW et al. 2018) und nicht wie hier angenommen Erdneigungs-Zyklen mit einer Dauer von ca. 40 ka (Tab. 9, 10).

In den Latemar-Karbonaten ist die Nettoakkumulationsrate 165 m/Ma bei einer Akkumulationszeit von 2,8 Ma (ZÜHLKE et al. 2003, 2003a). Nach dem hier entwickelten Zeitmodell ist sie mit 200 m/Ma (460 m in $\approx 2,3$ Ma) etwa 25 Mal höher als in der Buchenstein-Formation. Die Raten von 165 m/Ma und 200 m/Ma liegen weitab diskutierter Extremwerte (Tab. 9).

7.3 Milankovitch Zyklen in der Mittleren Trias: im Muschelkalk ≈ 400 ka und ≈ 100 ka, in Seceda ≈ 40 ka, in Latemar ≈ 400 ka und ≈ 40 ka sowie ≈ 4 ka-Sub-Milanković-Zyklen

7.3.1 Muschelkalk

Im Muschelkalk sind die „Kleinzyklen“ (Kap. 6.1) und die Zyklen von K.-C. Käding (schriftl. Mitt. 2015; Kap. 7.2: Abb. 4; hier werden sie neutral Korrelationseinheiten genannt) über große Teile des Beckens zu parallelisieren (Tab. 10). Sie dürften somit allozyklisch und zur numerischen Kalibrierung des Muschelkalks geeignet sein.

Den 12 Zyklen von Kap. 6.1. werden hier je 400 ka (lange Exzentrizität) zugeordnet. Der Muschelkalk dauert so ca. 4,8 Ma statt 4,86 Ma bei Zugrundelegung von 405 ka-Zyklen. Die Differenz von 0,06 Ma ist aufgrund anderweitiger Unwägbarkeiten vernachlässigbar. K.-C. Käding (schriftl. Mitt. 2015) teilt den Muschelkalk in 52 Zyklen à 100 ka (kurze Exzentrizität), die eine Dauer von $\approx 5,2$ Ma ergeben. Er stützt sich vor allem auf Gamma-Logs und

Geschwindigkeits-Logs aus Bohrungen im mittleren und nördlichen Deutschland, wo ein oft höherer Tonanteil als im Süden Deutschlands das Aushalten von Zyklen begünstigt.

Die für die Kalibrierung der RSS nicht unwesentliche Differenz von 0,4 Ma zwischen den Längen von 5,2 Ma und 4,8 Ma wird im höheren Buntsandstein weithin kompensiert. KÄDING (in MENNING & KÄDING 2013) kommt dort zu einer Dauer von 1,5 Ma: Folge s6 mit drei, Folge s7 mit 12 Zyklen à 100 ka, wohingegen sich aus Kap. 6.1 eine Dauer von 2,0 Ma ergibt: fünf Zyklen in den Folgen s6/s7, denen hier je 400 ka zugeordnet werden (Tab. 6).

7.3.2 Seceda, hemipelagische Buchenstein-Formation

Im Seceda-Bohrkern hält MAURER (2003) in dem für eine Analyse geeignetsten Teufenbereich 92–64 m 67 Zyklen aus, die im Mittel 41,7 cm mächtig sind („40 cm-Zyklus“). Hier wird ihnen eine Dauer von

Authors	Central Europe					South Europe			
	cycle duration acc. MILANKOVITCH (1941) \approx ka								
	Germanic Triassic					hemipelagic Buchenstein Fm.		neritic Latemar carbonates	
s 6-7	m 1-3	m 4-6	m 7-9	k 1-2					
SCHÜLLER '67, SCHULZ '72	-	100	-	-	-	-	-	-	-
KRAMM 1986: Abb. 4, 1994	-	100 400	-	-	-	-	-	-	-
GOLDHAMMER et al. '87, '90 HINNOV & GOLDH. '91								20 ²	
RÖHL 1990, 1993	-	-	-	(100) (400)	-	-	-	-	-
BRACK & RIEBER 1993	-	-	-	-	-	-	-	5-8 ²	
GAETNER & RÖHLING '93	-	-	100	-	-	-	-	-	-
GÖTZ 1994, GÖTZ & FEISTBURGHARDT 1999, RAMEIL et al. 2000: 9-10, Fig. 7	-	100 400	-	-	-	-	-	-	-
MUNDIL et al. 1996	-	-	-	-	-	-	-	<< 20 ²	
PRETO et al. 2001, PRETO 2003: Fig. 13, 15	-	-	-	-	-	-	-	17.6 ² , 35.6, 95, 200, 400	
BRÜCKNER-RÖHLING 2000, BRÜ.-R. & HEUNISCH 2004	-	-	100	-	-	-	-	-	-
KEDZIERSKI 2002	-	100	-	-	-	-	-	-	-
PÖPPELREITER 2002		100							
STD 2002	100	-	-	-	400	-	-	-	-
ZÜHLKE 2003, ZÜHLKE et al. 2003a, b								4.2 ² , \approx 21 \approx 40, \approx 100	
MAURER 2003: 112-113	-	-	-	-	-	100 ¹ , 40		-	-
MAURER et al. 2004: 83, 95, Fig. 8	-	-	-	-	-	100/98 ¹ , 38.9, 19.1		-	-
KENT et al. 2004: 374-375	-	-	-	-	-	-		1.7 ² , 20, 400	
KOZUR & BACHMANN '03b, '05, '08, BACHM. & K. 2004			100					-	-
MENNING et al. 2005: Tab1			100		400			-	-
SZURLIES 2007: 617	100	-	-	-	-	-	-	-	-
KÄDING in MEN. & K. 2013	100	-	-	-	-	-	-	-	-
KÄDING, writt. comm. 2015	-		100					-	-
STD 2016			100		400			-	-
WOTZLAW et al. 2018								18.5 \pm 2.1 ¹	-
NITSCH et al. '19, chapt.6.1			400					-	-
MENNING 2019 this work		\approx 400 100			\approx 400		\approx 40 ¹	\approx 3.7 ² , \approx 18.5 \approx 40, \approx 100 \approx 400	

¹ Average duration of Seceda-cycle in core-interval 92–64 m: \approx 40 cm thick in average

² Average duration of dominant Latemar-cycle: \approx 90 cm thick in average

Tab. 10: Dauer triassischer Zyklen in Mitteleuropa und Südeuropa

je ≈ 40 ka zugeordnet (Erdneigung), aus der eine Zeitspanne von 2,7 Ma resultiert, die konsistent mit den RIA von MUNDIL et al. (1996; Abb. 3a, b, 5, vgl. Abschn. 5.1.5) ist. Dies spricht für eine orbital-klimatische Genese dieser Zyklen, die sich zumeist aus ca. 10 Basiszyklen zusammensetzen, die im Mittel ≈ 4 ka lang sind (vgl. Abb. 5).

7.3.3 Latemar-Plattform-Karbonate der Schlern-Formation

Sofern es in den Latemar-Karbonaten orbital verursachte Milankovitch-Zyklen gibt, können dies, wie in der Buchenstein-Formation, nicht die Basiszyklen sein. So bilden nach ZÜHLKE (2003) und ZÜHLKE et al. (2003a, b) fünf (meist 4–6) im Mittel 4,2 ka dauernde Sub-Milankovitch-Basiszyklen einen 21 ka-Zyklus (lange Präzession; s. Abschn. 5.1.2.3, 5.1.5). Bei der hier angesetzten mittleren Dauer von $\approx 3,7$ ka je Zyklus und der minimalen Zahl von 619 Zyklen verbessert sich die Vereinbarkeit mit der biostratigraphischen Reichweite der Gesamtabfolge noch. Derart abgeschätzt akkumulierten die Latemar-Karbonate in $\approx 2,3$ Ma (Abb. 5). Jede andere mittlere Zyklendauer als $4 \pm \approx 1$ ka ist inkonsistent mit den RIA, sowohl die mittlere Dauer von ≈ 20 ka (GOLDHAMMER et al. 1987, 1990, PRETO et al. 2001, PRETO 2003) als auch die mittlere Dauer von 1,7 ka (KENT et al. 2004, 2006). Ursache für die Sub-Milankovitch-Zyklizität könnten „solar fluctuations“ sein (KENT et al. 2004: 375) oder spekulativ auch „tidal amplitude variations“ (KENT et al. 2006: 848).

7.3.4 Fazit

Zusammenfassend ist zur Dauer von Zyklen in der karbonatischen bis mergeligen Mittleren Trias zu sagen: Im Muschelkalk sind 400 ka-Zyklen (lange Exzentrizität) am ehesten beckenweit zu korrelieren, wengleich bei hinreichendem Tongehalt auch 100 ka-Zyklen (kurze Exzentrizität) über hunderte von Kilometern mittels Gamma-Log und Geschwindigkeits-Log korreliert werden können. 40 ka-Zyklen charakterisieren die hemipelagische Buchenstein-Formation. In den lagunären Latemar-Karbonaten hat der augenfällige 87 cm-Basiszyklus eine mittlere Dauer von ≈ 4 ka: Zumeist fünf solcher Zyklen bilden einen Präzessionszyklus (≈ 20 ka), oft 10 einen Erdneigungs-Zyklus (≈ 40 ka).

Schon von WAHL (1808, in BROSCHE & DRUNKENMÖLLE 2018) weist nach, dass die Schiefe der Ekliptik (Erdneigung) infolge der Anziehungskraft benachbarter Planeten, insbesondere der Venus, variieren muss. Diese Variation ist klimawirksam in Form des ≈ 40 ka-Zyklus. Im Leistungsspektrum der astro-

nomischen Parameter der Erde für die letzten zehn Millionen Jahre (spätes Miozän, Pliozän, Quartär) ist der ≈ 40 ka-Zyklus (39/41 ka-Zyklus) der markanteste innerhalb des Milankovitch-Spektrums; es folgen der 405 ka-Zyklus (≈ 400 ka-Zyklus) und der 19/22,3/23,6 ka Zyklus (≈ 20 ka-Zyklus; HILGEN et al. 2015: Fig. 11).

Der bisher in den Südalpen oft unterschätzte 40 ka-Zyklus hat ein Pendant im Quartär: Er dominiert dort lange und wird erst spät vom 100 ka-Zyklus abgelöst (GIBBARD et al. 2004, f.).

8. Zusammenfassung

Der Muschelkalk gehört in die beiden Unterstufen Pelsonium und Illyrium des Anisiums und in die frühe Fassium-Unterstufe des Ladiniums. Inwieweit er bereits im Bithynium beginnt, so nach marinen Formen, ist umstritten. Zyκλοstratigraphisch dauert die Muschelkalk-Gruppe $\approx 4,8$ Ma bzw. $\approx 5,2$ Ma statt der ≈ 7 Ma in der STD 2016. Die Dauer von $\approx 4,8$ Ma basiert auf 12 Komposit-/Kleinzyklen von NITSCH et al. (Kap. 6.1), denen jeweils 0,4 Ma zugeordnet werden (lange Exzentrizität). Auf dieser Grundlage und bei Integration vielfältiger Zeitindikationen beginnt die Muschelkalk-Gruppe bei $\approx 245,8$ Ma und endet bei $\approx 241,0$ Ma (Abb. 8). Auf der Basis von 52 über große Teile des Germanischen Beckens korrelierten Zyklen (Korrelationseinheiten) kommt K.-C. Käding (schriftl. Mitt. 2015) zu einer Dauer von $\approx 5,2$ Ma (100 ka-Zyklen, kurze Exzentrizität). Auch diese Sichtweise ist weithin konsistent mit den radio-isotopischen Altersbestimmungen (RIA, Abb. 9).

Die vorstehenden absoluten Alter basieren auf U-Pb CA-TIMS-RIA an Zirkon, während TIMS-RIA an Einzelkörnern und TIMS-Multikornpräparate üblicherweise etwas niedrigere Alter haben. Mit Hilfe der Linienanpassung (straight line-fit) sind letztere mit den CA-TIMS-Altern integriert, um sie in die numerische Kalibrierung von Ammonoideen- und Conodontenzonen sowie der Unterstufen und Stufen der Tethys einzubeziehen (Abb. 3, 5). Dafür werden auch als geologische Zeitindikation die Mächtigkeiten hemipelagischer Sedimente und die zyκλοstratigraphisch kalibrierte Muschelkalk-Abfolge integriert. Zur Korrelation der mit Hilfe von RIA kalibrierten Globalen Stratigraphischen Skala (GSS) und der zyκλοstratigraphisch kalibrierten Regionalen Stratigraphischen Skala (RSS) von Mitteleuropa werden neben marinen Formen auch palynologische und magnetostratigraphische Marker genutzt. Der parallele, divergierende, horizontale oder schräge Verlauf der Korrelationslinien zwischen GSS und RSS zeigt, inwieweit Korrelationen und Kalibrierungen zueinander konsistent bzw. inkonsistent sind (Abb. 7, 8, 9).

Aus der verbesserten numerischen Kalibrierung des Muschelkalks und der globalen Mittleren Trias resultieren folgende Ergebnisse bzw. Thesen: (1) Bei einer Dauer des Oberen Muschelkalks von 2,3 Ma ist die mittlere Länge seiner 15 Ceratitenzonen ≈ 150 ka (Tab. 4). (2) In der tethyalen Trias haben die in Tab. 4 kompilierten Faunenzone eine Länge zwischen $\approx 0,35$ Ma und $\approx 1,9$ Ma. Die Dauer der Substufen schwankt zwischen $\approx 0,4$ Ma und $\approx 2,7$ Ma (Abb. 7, 8, 9). (3) Die Korrelation von GSS und RSS legt nahe, dass der Ammonit *Balatonites ottonis* zunächst in der westlichen Tethys erschien, während in Mitteleuropa noch terrestrisches Milieu persistierte. Die FOD von *B. ottonis* dürften in beiden Räumen diachron sein (Abb. 11). Diese These berührt nicht die Relevanz der marinen Biostratigraphie, sondern ist der Muschelkalk-Transgression geschuldet. (4) In den Südalpen spiegelt sich der Beginn dieser dort bisher nicht gesehenen Transgression wahrscheinlich im Übergang des flachmarinen Angolo-Kalksteins zum tiefermarinen Prezzo-Kalkstein wider (Abb. 10). (5) Die Nettoakkumulationsraten variieren extrem: ≈ 200 m/Ma: Latemar-Karbonate und spätes Rotliegend, Zechstein und Buntsandstein, 75 m/Ma: Muschelkalk – jeweils im Zentrum des Mitteleuropäischen Beckens, 8 m/Ma: Buchenstein-Formation im Seceda-Bohrkern (92–64 m, ohne Turbidite) und in Bagolino (Tab. 9). (6) Im Muschelkalk sind 400 ka-Zyklen am ehesten beckenweit zu korrelieren. In den Südalpen dominieren in der hemipelagischen Buchenstein-Formation ≈ 40 ka lange Zyklen und in den lagunären Latemar-Karbonaten die Basiszyklen mit einer mittleren Dauer von ≈ 4 ka: Oft bilden ca. fünf solcher Zyklen einen Präzessionszyklus (≈ 20 ka) und ca. zehn Zyklen einen ≈ 40 ka langen Erdneigungszyklus (Tab. 5, 10). Diese Zeitspannen sind konsistent mit der Gesamtheit der globalen RIA.

Dank

Sehr herzlich gedankt wird Edgar Nitsch, Freiburg i. Br., Elmar Kramm, Fulda, und Theo Simon, Fichtenberg, vormals Freiburg i. Br., für ihre grundlegende Analyse der sedimentären Zyklen im Muschelkalk (Kap. 6.1), Karl-Christian Käding, Kassel, für seine alternative Zyklizität im Muschelkalk, Peter Brack, Zürich, für die biostratigraphischen Informationen zum Monte Corona-Profil in den Südalpen und Literatur sowie den Gutachtern Johannes Glodny, Potsdam, Edgar Nitsch, Freiburg i. Br., Theo Simon, Fichtenberg, Max Urlichs, Leonberg, und Thomas Voigt, Jena, für die sehr hilfreiche und anregende Durchsicht des Manuskripts. Ein besonderer Dank gilt dem Graphik-Designer des GFZ Andreas Hendrich für seine zahllosen Verbesserungen und seine Ausdauer bei der Modifizierung der Abbildungen und

Hans Hagdorn für seine grundlegenden Informationen, so zu den Abschn. 2.1, 3.2 und 4.2, seine sehr hilfreichen stilistischen Verbesserungen sowie sein kritisches Hinterfragen.

9. Literatur

- AFANASYEV, G. D. & ZYKOV, S. I. (1975): Geochronologische Zeitskala des Phanerozoikums auf der Grundlage signifikant neuer Zerfallskonstanten: 100 S.; Moskau (Nauka) [in Russisch].
- ANTONESCU, E., PATRULIUS, D. & POPESCU, I. (1976): Corrélation on palynologique préliminaire de quelques formations de Roumanie attribuées au Trias Inférieur. – *Dari de seama ale sedintelor*, 62: 3–30; Bukarest.
- ARMSTRONG, R. L. (1978): Pre-Cenozoic Phanerozoic time scale – computer file of critical dates and consequences of new and in-progress decay-constant revisions. – In: COHEE, G. V., GLAESSNER, M. F. & HEDBERG, H. D. (Eds.): *Contributions to the geological time scale*. – American Association of Petroleum Geologists, *Studies in Geology*, 6: 73–91; Tulsa.
- ASSERETO, R. (1971): Die Binodosus-Zone. Ein Jahrhundert wissenschaftlicher Gegensätze. – *Sitzungsberichte der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse)*, 179 (1): 25–53; Wien.
- ASSERETO, R. (1974): Aegean and Bithynian: Proposal for two new Anisian substages. – In: ZAPPE, H. (Hrsg.): *Die Stratigraphie der alpin-mediterranen Trias. The Stratigraphy of the Alpine-Mediterranean Triassic*. – Symposium Mai 1973 Wien, Österreichische Akademie der Wissenschaften, *Schriftenreihe der erdwissenschaftlichen Kommission*, 2: 23–39; Wien (Springer).
- BACHMANN, G. H. & KOZUR, H. (2004): The Germanic Triassic: correlations with the international chronostratigraphic scale, numerical ages and Milankovitch cyclicity. – *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften*, B 26: 17–62; Halle (Saale).
- BALINI, M., GAETANI, M. & NICORA, A. (1993): Excursion Day 2. – In: GAETANI, M. (Ed.): *Anisian/Ladinian boundary field workshop Southern Alps – Balaton Highland, 27 June – 4 July 1993, Field guide book*: 43–54; Milano.
- BALINI, M., LUCAS, S. G., JENKS, J. F. & SPIELMANN, J. A. (2010): Triassic ammonoid biostratigraphy: an overview. – In: LUCAS, S. G. (Ed.): *The Triassic Timescale*. – Geological Society of London, *Special Publication*, 334: 221–261.
- BARESEL, B., BUCHER, H., BROSE, M., CORDEY, F., KUANG, G.-D. & SCHALTEGGER, U. (2016): Precise age of the Permian-Triassic boundary in South China from high-precision U-Pb geochronology and Bayesian age-depth modelling. – *Solid Earth Diss.*, doi 10.5194/se-2016-145, 2016.
- BECHSTÄDT, T., BRACK, P., PRETO, N., RIEBER, H. & ZÜHLKE, R. (2003): Triassic geochronology and cyclostratigraphy – a field symposium. Field trip to Latemar, September 14–16/17 2003. – *Guidebook*: I-10, II-15, III-46; St. Christina/Val Gardena, Dolomites, Italy.
- BERGER, A. & LOUTRE, M. F. (1994): Astronomical forcing through geologic time. – *International Association of Sedimentologist, Special Publication*, 19: 15–24; Oxford.

- BITTNER, A. (1892): Was ist norisch? – Jahrbuch der Kaiserlich-Königlichen Geologischen Reichsanstalt, 42, 3: 387–396; Wien.
- BOIGK, H. (1959): Zur Gliederung und Fazies des Buntsandsteins zwischen Harz und Emsland. – Geologisches Jahrbuch, 76: 597–636; Hannover.
- BRACK, P. & RIEBER, H. (1993): Towards a better definition of the Anisian/Ladinian boundary: New biostratigraphic data and correlations of boundary sections from the Southern Alps. – *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 86: 415–527; Basel.
- BRACK, P. & RIEBER, H. (1994): The Anisian/Ladinian boundary: Retrospective and new constraints. – *Alberiana*, 13: 25–36; Münster.
- BRACK, P. & RIEBER, H. (2019): *Chiseiceras dolomiticum* n. sp. (Ammonoidea) and its significance for the calibration of the Triassic platform interior stratigraphy at Latemar (Southern Alps, Italy). – *Swiss Journal of Palaeontology*, <https://doi.org/10.1007/s13358-019-09184-6>
- BRACK, P., MUNDIL, R., OBERLI, F., MEIER, M. & RIEBER, H. (1996): Biostratigraphic and radiometric age data question the Milankovitch characteristic of the Latemar cycles (Southern Alps, Italy). – *Geology*, 24 (4): 371–375; Boulder.
- BRACK, P., RIEBER, H. & URLICHS, M. (1999): Pelagic successions in the Southern Alps and their correlation with the Germanic Middle Triassic. – *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I*, 1998 (7/8): 853–876; Stuttgart.
- BRACK, P., RIEBER, H., NICORA, A. & MUNDIL, R. (2005): The Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) of the Ladinian Stage (Middle Triassic) at Bagolino (Southern Alps, Northern Italy) and its implications for the Triassic time scale. – *Episodes*, 28 (4): 233–244.
- BRACK, P., RIEBER, H., MUNDIL, R., BLENDINGER, W. & MAURER, F. (2007): Geometry and chronology of growth and drowning of Middle Triassic carbonate platforms (Cernera and Bivera/Clapsavon) in the Southern Alps (northern Italy). – *Swiss Journal of Geosciences*, 100: 327–347; Basel.
- BROSCHKE, P. & DRUNKENMÖLLE, R. (2018): Die Schiefe der Ekliptik und das Klima der Erde – Ein Vortrag von C. W. A. von Wahl, gehalten vor der literarischen Gesellschaft in Halberstadt am 6. Juli 1808. – *Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft*, 2018 (2): 18–28; Potsdam.
- BRÜCKNER-RÖHLING, S. (2000): Chemocyclicity in the Middle Muschelkalk of Northern Germany. – *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I*, 1998 (9/10): 941–951; Stuttgart.
- BRÜCKNER-RÖHLING, S. & HEUNISCH, C. (2004): Zyklostratigraphie und Palynofazies des Mittleren Muschelkalks der Bohrung Remlingen 7 (Norddeutsches Becken). – *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, Reihe B, Beiheft 18*: 109–120; Halle.
- BRUGMAN, W. A. (1986): A palynological characterization of the Upper Scythian and Anisian of the Transdanubian Central Range (Hungary) and the Vincentian Alps (Italy). – *Dissertation University Utrecht*: 95 p.; Utrecht.
- BRÜHWILER, T., HOCHULI, P. A., MUNDIL, R., SCHATZ, W. & BRACK, P. (2007): Bio- and chronostratigraphy of the Middle Triassic Reifling Formation of the westernmost Northern Calcareous Alps. – *Swiss Journal of Geosciences*, 100: 443–455; Basel.
- BUDUROV, K., CALVET, F., GOY, A., MARQUEZ-ALIAGA, A., MARQUEZ, L., TRIFONOVA, E. & ARCHE, A. (1993): Middle Triassic stratigraphy and correlation in parts of the Tethys realm (Bulgaria and Spain). – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): *Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991. – Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg*, 2: 157–164; Korb (Goldschneck).
- DACHROTH, W. (1973): Das gesteinsmagnetische Verhalten im sandigen Muschelkalk aus Luxemburg und Saarland. – *Oberrheinische Geologische Abhandlungen*, 22: 45–50; Karlsruhe.
- DE VLEESCHOUWER, D., RAKOCIŃSKI, M., RACKI, G., BOND, P. G., SOBIEŃ, K. & CLAEYS, P. (2013): The astronomical rhythm of Late-Devonian climate change (Kowala section, Holy Cross Mountains, Poland). – *Earth and Planetary Science Letters*, 365: 25–37; Boulder.
- DOCKTER, J., PUFF, P., SEIDEL, G. & KOZUR, H. (1980): Zur Triasgliederung und Symbolgebung in der DDR. – *Zeitschrift für geologische Wissenschaften*, 8: 951–963; Berlin.
- ECKE, H.-H. (1986): *Palynologie des Zechsteins und Unteren Buntsandsteins im Germanischen Becken. – Dissertation Universität Göttingen*: 117 S.; Göttingen.
- EGENHOFF, S. O., PETERHÄNSEL, A., BECHSTÄDT, T., ZÜHLKE, R. & GRÖTSCH, J. (1999): Facies architecture of an isolated carbonate platform: tracing the cycles of the Latemar (Middle Triassic, northern Italy). – *Sedimentology*, 46 (5): 893–912.
- ELLWOOD, B. B., TOMKIN, J. H., EL HASSANI, A., BULTYNCK, P., BRETT, C. E., SCHINDLER, E., FEIST, R. & BARTHOLOMEW, A. J. (2011): A climate-driven model and development of a floating point time scale for the entire Middle Devonian Givetian Stage: A test using magnetostratigraphy susceptibility as a climate proxy. – *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 304 (1/2): 85–95; Amsterdam.
- EMMERICH, A., GLASMACHER, U. A., BAUER, F., BECHSTÄDT, T. & ZÜHLKE, R. (2005): Meso-/Cenozoic basin and carbonate platform development in the SW-Dolomites unraveled by basin modelling and apatite FT analysis: Rosengarten and Latemar (Northern Italy). – *Sedimentary Geology*, 175: 415–438.
- EMMERICH, A., TSCHERNY, R., BECHSTÄDT, T., BÜKER, C., LITKE, R. & ZÜHLKE, R. (2008): Numerical simulation of the syn- to postdepositional history of a prograding carbonate platform: the Rosengarten, Middle Triassic, Dolomites, Italy. – In: DE BOER, P. L., POSTMA, G., VAN DER ZWAN, Z. J., BURGESS, P. M. & KUKLA, P. (Eds.): *Analogue and Numerical Forward Modelling of Sedimentary Systems; from Understanding to Prediction. – International Association of Sedimentologists, Special Publication*, 40: 1–36; Wiley-Blackwell.
- ESTD 2005 (MENNING, M. & HENDRICH, A., Hrsg., 2005): *Erläuterungen zur Stratigraphischen Tabelle von Deutschland. – Newsletters on Stratigraphy*, 41 (1/3): 405 S., 19 Anl.; Berlin.
- FANTINI-SESTINI, N. (1988): Anisian ammonites from Gebze area (Kocaeli Peninsula, Turkey). – *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 94 (1): 35–80; Milano.
- FANTINI-SESTINI, N. (1989): *Kocaelia* gen. n. (Family Beyrichitidae) from Middle Anisian. – *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 95 (4): 343–350; Milano.

- FIEGE, K. (1938): Die Epirogenese des Unteren Muschelkalkes in Nordwestdeutschland, I. Teil. – Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, B 1938: 143–170; Stuttgart.
- FJALKOWSKA-MADER, A. (1999): Palynostratigraphy, palaeoecology and palaeoclimatology of the Triassic in South-Eastern Poland. – Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I, 1998 (7/8): 601–627; Stuttgart.
- FRANZ, M., KAISER, S. I., FISCHER, J., HEUNISCH, C., KUSTATSCHER, E., LUPPOLD, F. W., BERNER, U. & RÖHLING, H.-G. (2015): Eustatic and climatic control on the Upper Muschelkalk Sea (late Anisian/Ladinian) in the Central European Basin. – *Global and Planetary Change*, 135: 1–27; Amsterdam.
- GAERTNER, H. (1993): Zur Gliederung des Muschelkalks in Nordwestdeutschland in Tiefbohrungen anhand von Bohrlochmessungen. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991. – Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, 2: 57–64; Korb (Goldschneck).
- GAERTNER, H. & RÖHLING, H.-G. (1993): Zur lithostratigraphischen Gliederung und Paläogeographie des Mittleren Muschelkalks im Nordwestdeutschen Becken. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991. – Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, 2: 85–103; Korb (Goldschneck).
- GALFETTI, T., BUCHER, H., OVTCHAROVA, M., SCHALTEGGER, U., BRAYARD, A., BRÜHWILER, T., GOUEMAND, N., WEISSERT, H., HOCHULI, P. A., CORDEY, F. & GUODUN, K. (2007): Timing of the Early Triassic carbon cycle perturbations inferred from new U-Pb ages and ammonoid biochronozones. – *Earth and Planetary Science Letters*, 258: 593–604; Amsterdam.
- GIBBARD, P. L., BOREHAM, S., COHEN, K. M. & MOSCARIELLO, A. (2004): Global chronostratigraphical correlation table for the last 2.7 million years. Version 2004b. – www.quaternary.stratigraphy.org.uk
- GOLDHAMMER, R. K., DUNN, P. A. & HARDIE, L. A. (1987): High frequency glacio-eustatic sea-level oscillations with Milankovitch characteristics recorded in Middle Triassic platform carbonates in Northern Italy. – *American Journal of Sciences*, 287: 853–892.
- GOLDHAMMER, R. K., DUNN, P. A. & HARDIE, L. A. (1990): Depositional cycles, composite sea-level changes, cycle stacking patterns and the hierarchy of stratigraphic forcing. – *Geological Society of America, Bulletin*, 102: 535–562; Boulder.
- GÖTZ, A. E. (1994): Feinstratigraphie und Zyklengliederung im Unteren Muschelkalk (Raum Creuzburg – Westthüringen). – *Beiträge zur Geologie von Thüringen*, N.F. 1: 3–12; Jena.
- GÖTZ, A. E. & FEIST-BURKHARDT, S. (1999): Sequenzstratigraphische Interpretation der Kleinzyklen im Unteren Muschelkalk (Mitteltrias, Germanisches Becken). – *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, Teil 1, 1997 (7/9): 1205–1219; Stuttgart.
- GRĂDINARU, E., ORCHARD, M. J., NICORA, A., GALLET, Y., BESSE, J., KRYSZYN, L., SOBOLEV, E. S., ATUDOREI, N.-V. & IVANOVA, D. (2007): The Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) for the base of the Anisian Stage: Deșli Caira Hill, North Dobrogea, Romania. – *Albertiana*, 36: 54–71.
- GRADSTEIN, F. M. & OGG, J. (1996): A Phanerozoic time scale. – *Episodes*, 19 (1/2): 3–4, insert; Nottingham.
- GRADSTEIN, F. M., AGTERBERG, F. P., OGG, J. G., HARDENBOL, J., VAN VEEN, P., THIERRY, J. & HUANG, Z.-H. (1994): A Mesozoic time scale. – *Journal of Geophysical Research*, 99 (12): 24,051–24,074; Washington.
- GTS 1964 (HARLAND, W. B., SMITH, A. G. & WILCOCK, B., Eds., 1964): The Phanerozoic time-scale. – *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, 120s: 458 p.; London.
- GTS 1982 (HARLAND, W. B., COX, A. V., LLEWELLYN, P. G., PICKTON, C. A. G., SMITH, A. G. & WALTERS, R., 1982): A geologic time scale: 131 p.; Cambridge (Cambridge University Press).
- GTS 1989 (HARLAND, W. B., ARMSTRONG, R. L., COX, A. V., CRAIG, L. E., SMITH, A. G. & SMITH, D. G., Eds., 1990): A geologic time scale 1989: 263 p.; Cambridge (Cambridge University Press).
- GTS 2004 (GRADSTEIN, F. M., OGG, J. G., SMITH, A. G., Eds., 2004): A geologic time scale 2004: XIX + 589 p.; Cambridge (Cambridge University Press). (publ. 2005)
- GTS 2008 (OGG, J. G., OGG, G. & GRADSTEIN, F. M., Eds., 2008): The Concise Geologic Time Scale: 177 p.; Cambridge (Cambridge University Press).
- GTS 2012 (GRADSTEIN, F. M., OGG, J. G., SCHMITZ, M. D. & OGG, G. M., Eds., 2012): The geologic time scale 2012: 1176 p. (2 vol.); Elsevier.
- GTS 2016 (OGG, J. G., OGG, G. M. & GRADSTEIN, F. M., Eds., 2016): A Concise Geologic Time Scale: 234 p.; Elsevier.
- HAAS, J. & BUDAI, T. (2002): Megatectonic setting and structural units of Hungary. – STS/IGCP 467 Field Meeting, Veszprém 2002: 66–70; Budapest (Geological Institute of Hungary, Hungarian Geological Society).
- HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.) (1993): Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991. – Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, 2: 288 S.; Korb (Goldschneck).
- HAGDORN, H. & SIMON, T. (1993): Ökostratigraphische Leitbänke im Oberen Muschelkalk. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991. – Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, 2: 193–208; Korb (Goldschneck).
- HAGDORN, H. & SIMON, T. (2005): Der Muschelkalk in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. – *Newsletters on Stratigraphy*, 41 (1/3): 143–158; Berlin.
- HAGDORN, H., MENNING, M., NITSCH, E. & SIMON, T. (im Druck): Die Muschelkalk-Gruppe in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016 (STD 2016) / The Muschelkalk Group in the Stratigraphic Table of Germany 2016 (STG 2016). – *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*; Hannover.
- HAQ, B. U., HARDENBOL, J. & VAIL, P. R. (1988): Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea level change. – *Sedimentary Geology, Special Publication*, 42: 71–108.
- HELLMANN, K. N. & LIPPOLT, H. J. (1981): Calibration of the Middle Triassic time scale by conventional K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ dating of alkali feldspars. – *Journal of Geophysics*, 50: 73–88; Berlin.
- HEUNISCH, C. (1999): Die Bedeutung der Palynologie für Biostratigraphie und Fazies in der Germanischen Trias.

- In: HAUSCHKE, N. & WILDE, V. (Hrsg.): *Trias. Eine ganz andere Welt*: 207–220; München (Pfeil).
- HILGEN, F. J., HINNOV, L. A., ABDUL AZIZ, H., ABELS, H. A., BATENBURG, S., BOSMANS, J. H. C., DE BOER, B., HÜSING, S. K., KUIPER, K. F., LOURENS, L. J., RIVERA, T., TÜENTER, E., VAN DE VAL, R. S. W., WOTZLAW, J.-F. & ZEEDEEN, C. (2015): Stratigraphic continuity and fragmentary sedimentation: the success of cyclostratigraphy as part of integrated stratigraphy. – In: SMITH, D. G., BAILEY, R. J., BURGESS, P. M. & FRASER, A. J. (Eds.): *Strata and Time. Probing the Gaps in Our Understanding*. – Geological Society of London, Special Publication, 404: 157–197; London.
- HINNOV, L. (2006): Discussion of „Magnetostratigraphic confirmation of a much faster tempo for sea-level change for the Middle Triassic Latemar platform carbonates“ by D.V. Kent, G. Muttoni and P. Brack [2004, *Earth and Planetary Science Letters*, 228: 369–377]. – *Earth and Planetary Science Letters*, 243: 841–846.
- HINNOV, L. A. & GOLDHAMMER, R. K. (1991): Spectral analysis of the Middle Triassic Latemar Limestone. – *Journal of Sedimentary Petrology*, 61: 1173–1193.
- ICS 2018/8 (INTERNATIONAL COMMISSION ON STRATIGRAPHY, Ed., 2018): *International Chronostratigraphic Chart*. – pocket version, www.stratigraphy.org.
- IKEDA, M. & TADA, R. (2014): A 70 million year astronomical time scale for the deep-sea bedded chert sequence (Inuyama, Japan): Implications for Triassic–Jurassic geochronology. – *Earth and Planetary Science Letters*, 399: 30–43; Amsterdam.
- JENKS, J. F., MONNET, C., BALINI, M., BRAYARD, A. & MEIER, M. (2015): Biostratigraphy of Triassic ammonoids. – In: KLUG, C., KORN, D., DE BATES, K., KRUTA, I. & MAPES, R. H. (Eds.): *Ammonoid paleobiology, Volume II: from macroevolution to paleogeography*. – *Topics in Geobiology*, 44: 329–388; Amsterdam (Springer & Dordrecht).
- KĘDZIERSKI, J. (2002): Sequenzstratigraphie des Unteren Muschelkalks im östlichen Teil des Germanischen Beckens (Deutschland, Polen). – *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, Reihe B, Beiheft 16*: 1–52; Halle.
- KENT, D. V. & OLSON, P. E. (2000): Implications of astronomical climate cycles to the chronology of the Triassic. – *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I*, 1998 (11/12): 1463–1473; Stuttgart.
- KENT, D. V., MUTTONI, G. & BRACK, P. (2004): Magnetostratigraphic confirmation of a much faster tempo for sea-level change for the Middle Triassic Latemar platform carbonates. – *Earth and Planetary Science Letters*, 228: 369–377; Amsterdam.
- KENT, D. V., MUTTONI, G. & BRACK, P. (2006): Reply to „Discussion of „Magnetostratigraphic confirmation of a much faster tempo for sea-level change for the Middle Triassic Latemar platform carbonates“ by D.V. Kent, G. Muttoni and P. Brack [2004, *Earth and Planetary Science Letters* 228: 369–377]“ by L. Hinnov. – *Earth and Planetary Science Letters*, 243: 847–850; Amsterdam.
- KNAUST, D. (1998): Trace fossils and ichnofabrics on the Lower Muschelkalk carbonate ramp (Triassic) of Germany: tool for high-resolution sequence stratigraphy. – *Geologische Rundschau*, 87: 21–31; Stuttgart.
- KOLB, U. (1976): Lithofazielle und geologische Untersuchungen der Wellenkalkfolge des Subherzynen Beckens. – *Freiberger Forschungshefte, Reihe C*, 316: 41–70; Leipzig.
- KOZUR, H. (1975): Probleme der Triasgliederung und Parallelisierung der germanischen und tethyalen Trias. Teil II: Anschluss der germanischen Trias an die internationale Triasgliederung. – *Freiberger Forschungshefte, Reihe C*, 304: 51–77; Leipzig.
- KOZUR, H. (1989): The Permian-Triassic boundary in marine and continental sediments. – *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, 1988 (11/12): 1245–1277; Stuttgart.
- KOZUR, H. W. (1999): The correlation of the Germanic Buntsandstein and Muschelkalk with the Tethyan scale. – *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I*, 1998 (7/8): 701–725; Stuttgart.
- KOZUR, H. W. (2003a): Integrated ammonoid, conodont and radiolarian zonation of the Triassic and some remarks to Stage/Substage subdivision and the numeric age of the Triassic stages. – *Albertiana*, 28: 57–74; Utrecht.
- KOZUR, H. W. (2003b): Integrated ammonoid, conodont and radiolarian zonation of the Triassic. – *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, Reihe B*, 25: 49–79; Halle.
- KOZUR, H. W. & BACHMANN, G. H. (2003a): Remarks on the numerical age of the Triassic stages. – *Triassic geochronology and cyclostratigraphy – a field symposium (St. Christina, Italy, September 2003), Programme & Abstracts*: 41–42; Zürich (Eidgenössische Technische Hochschule, Department für Erdwissenschaften).
- KOZUR, H. W. & BACHMANN, G. H. (2003b): Remarks on the numerical age of the Triassic stages. – In: *Triassic geochronology and cyclostratigraphy – a field symposium (St. Christina, Italy, September 2003)*, Poster.
- KOZUR, H. W. & BACHMANN, G. H. (2005): Correlation of the Germanic Triassic with the international scale. – *Albertiana*, 32: 21–35; Utrecht.
- KOZUR, H. W. & BACHMANN, G. H. (2008): Updated correlation of the Germanic Triassic with the Tethyan scale and assigned numeric ages. – *Berichte der Geologischen Bundesanstalt*, 76: 53–58; Wien.
- KOZUR, H. W. & WEEMS, R. E. (2010): The biostratigraphic importance of conchostracans in the continental Triassic of the northern hemisphere. – *Geological Society of London, Special Publication*, 334: 315–417; London.
- KRAMM, E. (1986): Feinstratigraphische Untersuchungen im Unteren Muschelkalk Ost Hessens. – *Beiträge zur Naturkunde in Osthessen*, 22: 3–21; Fulda.
- KRAMM, E. (1994): Feinstratigraphie und Zyklengliederung im Unteren Muschelkalk (Trias, Anis) der Rhön (Mitteldeutschland). – *Beiträge zur Naturkunde in Osthessen*, 29: 5–34; Fulda.
- KRAMM, E. (2000): Ein Profil durch den Unteren Muschelkalk von Burgwenden (Nordthüringen). – *Beiträge zur Geologie von Thüringen, N.F.* 7: 125–136; Jena.
- KRYSTYN, L. (1983): Das Epidaurus-Profil (Griechenland) – ein Beitrag zur Conodonten-Standardisierung des tethyalen Ladin und Unterkarn. – *Österreichische Akademie der Wissenschaften, Schriftenreihe der Erdwissenschaftlichen Kommission*, 5: 231–258; Wien.
- KRYSTYN, L., BALINI, M. & NICORA, A. (2004): Lower and Middle Triassic stage and substage boundaries in Spiti. – *Albertiana*, 30: 40–53.

- KURZE, M. & KLEDITZSCH, O. (2018): Schwermineraluntersuchungen an Buntsandsteinproben aus zwei Bohrungen in Osthessen und die Frage nach der Klima- und stratigraphischen Relevanz der Ergebnisse. – *Kali & Stein*, 2018 (3): 34–48; Kassel.
- LANGEREIS, C. G., KRIJGSMAN, W., MUTTONI, G. & MENNING, M. (2010): Magnetostratigraphy – concepts, definitions, and applications. – *Newsletters on Stratigraphy*, 43 (3): 207–233; Berlin.
- LEHRMANN, D., ENOS, P., MONTGOMERY, P., PAYNE, J., ORCHARD, M., BOWRING, S., RAMEZANI, J., MARTIN, M., WEI, J., WANG, H., YU, Y., XIAO, J. & LI, R. (2002): Integrated biostratigraphy, magnetostratigraphy, and geochronology of the Olenekian-Anisian boundary in marine strata of Guandao section, Nanpanjiang Basin, south China: implications for timing of biotic recovery from the end-Permian extinction. – *STS/IGCP 467 Field Meeting, Veszprém 2002: 7–8*; Budapest (Geological Institute of Hungary, Hungarian Geological Society).
- LEHRMANN, D. J., PAYNE, J. L., ENOS, P., MONTGOMERY, P., WEI, J.-Y., YU, Y.-Y., XIAO, J.-F. & ORCHARD, M. (2005): Field Excursion 2: Permian-Triassic boundary and a Lower-Middle Triassic boundary sequence on the Great Bank of Guizhou, Nanpanjiang basin, southern Guizhou Province. – *Albertiana*, 33: 169–186; Utrecht.
- LEHRMANN, D., RAMEZANI, J., BOWRING, S., MARTIN, M., MONTGOMERY, P., ENOS, P., PAYNE, J. L., ORCHARD, M. J., WANG, H.-M. & WEI, J.-Y. (2006): Timing of recovery from the end-Permian extinction: Geochronologic and biostratigraphic constraints from south China. – *Geology*, 34: 1053–1056 and Data Repository Item 30 p.; Boulder.
- LI, H.-M. & WANG, J.-D. (1989): Magnetostratigraphy of Permo-Triassic boundary section of Meishan of Changxing, Zhejiang. – *Science in China*, B 32, 11: 1401–1408; Beijing.
- LIPPMANN, R., VOIGT, T., BAUNACK, C., FÖHLISCH, K. & LÜTZNER, H. (2005): Geochemische Zyklen im Unteren Muschelkalk (Typus-Profil der Jena Formation, Steudnitz). – *Zeitschrift für geologische Wissenschaften*, 33 (1): 27–50; Berlin.
- LISZKOWSKI, J. (1993): Die Selachierfauna des Muschelkalks in Polen: Zusammensetzung, Stratigraphie und Paläoökologie. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): *Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991*. – Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, 2: 177–185; Korb (Goldschneck).
- LUCAS, S. (2003): Triassic tetrapod footprint biostratigraphy and biochronology. – *Albertiana*, 28: 75–84; Utrecht.
- LUCAS, S. G. (Ed.) (2010): *The Triassic Timescale*. – Geological Society of London, Special Publication, 334: 514 p.; London (Bath).
- LUCAS, S. G. (Ed.) (2013): A new Triassic timescale. – In: TANNER, L. H.; SPIELMANN, J. A. & LUCAS, S. G. (Eds.): *The Triassic System*. – New Mexico Museum of Natural History and Science, Bulletin, 61: 366–374; Albuquerque.
- MATTINSON, J. M. (2005): Zircon U-Pb chemical abrasion (CA-TIMS) method: Combined annealing and multi-step partial dissolution analysis for improved precision and accuracy of zircon ages. – *Chemical Geology*, 220: 47–66; Amsterdam.
- MATYSIK, M. (2019): High-frequency depositional cycles in the Muschelkalk (Middle Triassic) of southern Poland: Origin and implications for Germanic Basin astrochronological scales. – *Sedimentary Geology*, 383: 159–180.
- MAURER, F. (2003): *Bedding rhythms in Triassic basins of the Southern Alps*. – Dissertation Vrije Universiteit Amsterdam: 130 p.; (Amsterdam).
- MAURER, F., HINNOV, L. A. & SCHLAGER, W. (2004): Statistical time-series analysis and sedimentological tuning of bedding rhythms in a Triassic basinal succession (Southern Alps, Italy). – In: D'ARGENIO, B., FISCHER, A., PREMOLI SILVA, I. & WEISSERT, H. (Eds.): *Multidisciplinary approach to Cyclostratigraphy*. – Society of Sedimentary Geologists, Special Publication, 81: 83–99.
- MENNING, M. (1989): A Synopsis of Numerical Time Scales 1917–1986. – *Episodes*, 12 (1): 3–5, wall chart; Ottawa.
- MENNING, M. (1990): A new scheme for the Permian and Triassic of Central Europe. – *Permophiles*, 16: 14; Calgary (UGS Subcommittee on Permian Stratigraphy).
- MENNING, M. (1991): Rapid subsidence in the Central European Basin during the initial development (Permian-Triassic boundary sequences, 258–240 Ma). – *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil 1*, 1991 (4): 809–824; Stuttgart.
- MENNING, M. (1995): A numerical time scale for the Permian and Triassic periods: an integrated time analysis. – In: SCHOLLE, P. A., PERYT, T. M. & ULMER-SCHOLLE, D. S. (Eds.): *The Permian of Northern Pangea*. – 1: 77–97; Berlin (Springer).
- MENNING, M. & KÄDING, K.-C. (2013): Magnetostratigraphie, Zyklostratigraphie, geologische Zeitskala und Nomenklatur des Buntsandstein von Mitteleuropa. – In: *Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Koordination und Redaktion: LEPPER, J. & RÖHLING, H.-G. für die Subkommission Perm-Trias): Stratigraphie von Deutschland XI. – Der Buntsandstein*. – Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 69: 165–212; Hannover.
- MENNING, M., WEYER, D., DROZDZEWSKI, G., AMEROM, H. W. J. VAN & WENDT, I. (2000): A Carboniferous Time Scale 2000: discussion and use of geological parameters as time indicators from Central and Western Europe. – *Geologisches Jahrbuch, Reihe A*, 156: 3–44; Hannover.
- MENNING, M., GAST, R., HAGDORN, H., KÄDING, K.-C., SIMON, T., SZURLIES, M. & NITSCH, E. (2005): Zeitskala für Perm und Trias in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002, zyκλοstratigraphische Kalibrierung von höherer Dyas und Germanischer Trias und das Alter der Stufen Radium bis Rhaetium 2005. – *Newsletters on Stratigraphy*, 41 (1/3): 173–210; Berlin.
- MENNING, M., GLODNY, J., BROCKE, R., JANSEN, U., SCHINDLER, E. & WEYER, D. (2017): Die Devon-Zeitskala der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016 (STD 2016) / The Devonian time scale in the Stratigraphic Table of Germany 2016 (STG 2016). – *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 168 (4): 465–482.
- MEYERS, S. R. (2008): Resolving Milankovitchian controversies: The Triassic Latemar Limestone and the Eocene Green River Formation. – *Geology*, 36: 319–322; Boulder.
- MIETTO, P. & MANFRIN, S. (1995): A high resolution Middle Triassic ammonoid standard scale in the Tethys Realm.

- A preliminary report. – *Bulletin de la Société géologique de France*, 166 (5): 539–563; Paris.
- MIETTO, P., GIANOLLA, P., MANFRIN, S. & PRETO, N. (2003): Refined ammonoid biostratigraphy of the Bagolino section (Lombardian Alps, Italy), GSSP candidate for the base of the Ladinian Stage. – *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 109 (3): 33–48.
- MIETTO, P., MANFRIN, S., PRETO, N., RIGO, M., ROGGI, G., FURIN, S., GIANOLLA, P., POSENATO, R., MUTTONI, G., NICORA, A., BURATTI, N., CIRILLI, S., SPÖTL, C., RAMEZANI, J. & BOWRING, S. A. (2012): The Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) of the Carnian Stage (Late Triassic) at Prati di Stuares/Stuares Wiesen Section (Southern Alps, NE Italy). – *Episodes*, 35 (3): 414–430.
- MILANKOVITCH, M. (1941): Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitproblem. – *Königlich Serbische Akademie*, 33: 633 S.; Belgrad.
- MOJSISOVICS, E. v. (1869): Über die Gliederung der oberen Triasablagerungen in den östlichen Alpen. – *Verhandlungen der Kaiserlich-Königlichen geologischen Reichsanstalt*, 19: 90–150; Wien.
- MOJSISOVICS, E. v., WAAGEN, W. & DIENER, C. (1895): Entwurf einer Gliederung der pelagischen Sedimente des Trias-Systems. – *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften Wien, mathematisch-naturwissenschaftliche Classe, Abteilung I*, 104: 1271–1302; Wien.
- MONNET, C., BRACK, P., BUCHER, H. & RIEBER, H. (2008): Ammonoids of the middle/late Anisian boundary (Middle Triassic) and the transgression of the Prezzo Limestone in eastern Lombardy-Giudicarie (Italy). – *Swiss Journal of Geosciences*, 101: 61–84; Basel.
- MOSTLER, H. (1993): Das Germanische Muschelkalkbecken und seine Beziehungen zum tethyalen Muschelkalkmeer. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): *Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991. – Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg*, 2: 11–14; Korb (Goldschneck).
- MUNDIL, R., BRACK, P., MEIER, M., RIEBER, H. & OBERLI, F. (1996): High resolution U-Pb dating of Middle Triassic volcanoclastics: Time-scale calibration and verification of tuning parameters for carbonate sedimentation. – *Earth and Planetary Science Letters*, 141: 137–151; Amsterdam.
- MUNDIL, R., ZÜHLKE, R., BECHSTÄDT, T., BRACK, P., EGENHOFF, S., MEIER, M., OBERLI, F., PETERHÄNSEL, A. & RIEBER, H. (2003): Cyclicities in Triassic platform carbonates: synchronizing radio-isotopic and orbital clocks. – *Terra Nova*, 15 (2): 81–87; Oxford.
- MUNDIL, R., PALFY, J., RENNE, P. R. & BRACK, P. (2010): The Triassic timescale: new constraints and a review of geochronological data. – In: LUCAS, S. G. (Ed.): *The Triassic Timescale. – Geological Society of London, Special Publication*, 334: 41–60; London.
- MUTTONI, G., KENT, D. V. & GAETANI, M. (1994): The base of the Anisian. A candidate Global Stratotype Section and Point from Chios Island (Greece). – *Albertiana*, 13: 37–43; Münster.
- MUTTONI, G., KENT, D. V., MECO, S., NICORA, A., GAETANI, M., BALINI, M., GERMANI, D. & RETTORI, R. (1996a): Magnetostratigraphy of the Spathian to Anisian (Lower to Middle Triassic) Kçira section, Albania. – *Geophysical Journal International*, 127: 503–514; Belfast.
- MUTTONI, G., KENT, D. V., NICORA, A., RIEBER, H. & BRACK, P. (1996b): Magneto-biostratigraphy of the 'Buchenstein Beds' at Frötschbach (Western Dolomites, Italy). – *Albertiana*, 17: 51–56; Münster.
- MUTTONI, G., NICORA, A., BRACK, P. & KENT, D. V. (2004): Integrated Anisian-Ladinian boundary chronology. – *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 208: 85–102; Amsterdam.
- NAWROCKI, J. (1997): Permian to Early Triassic magnetostratigraphy from the Central European Basin in Poland: Implications on regional and worldwide correlations. – *Earth and Planetary Science Letters*, 152: 37–58; Amsterdam.
- NAWROCKI, J. & SZULC, J. (2000): The Middle Triassic magnetostratigraphy from the Peri-Tethys basin in Poland. – *Earth and Planetary Science Letters*, 182: 77–92; Amsterdam.
- NÉMETH, K. & BUDAI, T. (2009): Diatremes cut through the Triassic carbonate platforms in the Dolomites? Evidence from and around the Latemar; northern Italy. – *Episodes*, 32 (2): 74–83.
- NITSCH, E. (2018): Der Keuper in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016: kontinuierliche oder lückenhafte Überlieferung? / The Keuper Group in the Stratigraphic Table of Germany 2016: a continuous or discontinuous stratigraphic record? – *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 169 (2): 181–201.
- NITSCH, E., SEEGIS, D., VATH, U. & HAUSCHKE, N. (2005): Sedimente und Sedimentationspausen im deutschen Keuper: Wie vollständig ist die Überlieferung der späten Triaszeit? – *Newsletters on Stratigraphy*, 41 (1/3): 225–251; Berlin.
- NITSCH, E., KRAMM, E. & SIMON, T. (dieser Band): *Zyklostratigraphie des Muschelkalks*. – In: *Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Koordination und Redaktion: HAGDORN, H. & SIMON, T. für die Subkommission Perm-Trias): Stratigraphie von Deutschland XIII. – Muschelkalk. – Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 91; Berlin.
- ODIN, G. S. (1982): The Phanerozoic time scale revisited. – *Episodes*, 1982 (3): 3–9; Ottawa.
- ODIN, G. S. (1994): Geological time scale (1994). – *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, 318 (II): 59–71.
- ORCHARD, M. J. (2010): Triassic conodonts and their role in stage boundary definitions. – In: LUCAS, S. G. (Ed.): *The Triassic Timescale. – Geological Society of London, Special Publication*, 334: 139–161; London.
- OLSEN, P. E. & KENT, D. V. (1999): Long-period Milankovitch cycles from the Late Triassic and Early Jurassic of eastern North America and their implications for the calibration of the Early Mesozoic time-scale and the long-term behaviour of the planets. – *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A 357: 1761–1786; London.
- OVTCHAROVA, M., BUCHER, H., SCHALTEGGER, U., GALFETTI, T., BRAYARD, A. & GUÉX, J. (2006): New Early to Middle Triassic U-Pb ages from South China: calibration with the ammonoid biochronology and implications for the tempo of the Triassic biotic recovery. – *Earth and Planetary Science Letters*, 243: 463–475; Amsterdam.

- OVTCHAROVA, M., GOUEMAND, N., HAMMER, Ø., KUANG, G.-D., CORDEY, F., GALFETTI, T., SCHALTEGGER, U. & BUCHER, H. (2015): Developing a strategy for accurate definition of a geological boundary through radio-isotopic and biochronological dating: The Early-Middle Triassic boundary (South China). – *Earth-Science Reviews*, 146: 65–76.
- PÁLFY, J., PARRISH, R. R. & VÖRÖS, A. (2002): Integrated U-Pb geochronology and ammonoid biochronology from the Anisian/Ladinian GSSP candidate section at Felsőörs. – STS/IGCP 467 Field Meeting, Veszprém, 2002: 28; Budapest (Geological Institute of Hungary, Hungarian Geological Society).
- PÁLFY, J., PARRISH, R. R., DAVID, K. & VÖRÖS, A. (2003): Mid-Triassic integrated U-Pb geochronology and ammonoid biochronology from the Balaton Highland (Hungary). – *Journal of the Geological Society of London*, 160: 271–284; London.
- PALMER, A. R. (1983): The decade of North American geology 1983 Geologic Time Scale. – *Geology*, 11 (9): 503–504.
- PETRUNOVA, L. (2002): Palynomorphs around the Ladinian/Carnian boundary in Northwest Bulgaria – A review of the palynostratigraphical units in Europe and comparisons with Bulgarian ones. – STS/IGCP 467 Field Meeting, Veszprém, 2002: 54–56; Budapest (Geological Institute of Hungary, Hungarian Geological Society).
- PIA, J. (1930): Grundbegriffe der Stratigraphie mit ausführlicher Anwendung auf die europäische Mitteltrias: 252 S.; Leipzig und Wien (Deuticke).
- PÖPPELREITER, M. (2002): Facies, cyclicity and reservoir properties of the Lower Muschelkalk (Middle Triassic) in the NE Netherlands. – *Facies*, 46: 11–132; Erlangen.
- PRATT, B. R. & JAMES, N. P. (1986): The St George Group (Lower Ordovician) flat island model for carbonate sedimentation in shallow epeiric seas. – *Sedimentology*, 33: 313–343.
- PRETO, N. (2003): Model – Forcing of the complete Milankovitch signal (precession, obliquity, eccentricity) with the elementary cycles in the same time scale as precession. – In: BECHSTÄDT, T., BRACK, P., PRETO, N., RIEBER, H. & ZÜHLKE, R.: Triassic geochronology and cyclostratigraphy – a field symposium. Field trip to Latemar, September 14–16/17 2003. – Guidebook: Part II: 15 p.; St. Christina/Val Gardena, Dolomites, Italy.
- PRETO, N., HINNOV, L. A., HARDIE, L. A. & DE ZANCHE, V. (2001): Middle Triassic orbital signature recorded in the shallow-marine Latemar carbonate buildup (Dolomites, Italy). – *Geology*, 29 (1/2): 1123–1126; Boulder.
- RAMEIL, N., GÖTZ, A. E. & FEIST-BURKHARDT, S. (2000): High resolution sequence interpretation of epeiric shelf carbonates by means of palynofacies analysis: an example from the Germanic Triassic (Lower Muschelkalk, Anisian) of East Thuringia, Germany. – *Facies*, 43: 123–144; Erlangen.
- RICKEN, W. (1986): Diagenetic bedding: a model for marl-limestone alternations. – *Lecture Notes in Earth Sciences*, 6: 210 p; Heidelberg (Springer).
- RIEBER, H. (1973): Cephalopoden aus der Grenzbitumenzone (Mittlere Trias) des Monte San Giorgio (Kanton Tessin, Schweiz). – *Schweizerische Paläontologische Abhandlungen*, 93: 1–96; Basel.
- RÖHL, U. (1990): Parallelisierung des norddeutschen oberen Muschelkalks mit dem süddeutschen Hauptmuschelkalk anhand von Sedimentationszyklen. – *Geologische Rundschau*, 79: 13–26; Stuttgart.
- RÖHL, U. (1993): Sequenzstratigraphie im zyklisch gegliederten Oberen Muschelkalk Norddeutschlands. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991. – Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, 2: 29–36; Korb (Goldschneck).
- SALVADOR, A. (1985): Chronostratigraphic and geochronometric Scales in COSUNA stratigraphic correlation charts of the United States. – *American Association of Petroleum Geologists*, 69 (2): 181–189; Tulsa.
- SCHATZ, W. (2004): Revision of the subgenus *Daonella* (*Arzelella*) (Halobiidea; Middle Triassic). – *Journal of Palaeontology*, 78: 300–316.
- SCHOURING, B. W. (1978): Mikroflora aus den Meridekalken des Mte. San Giorgio (Kanton Tessin). – *Schweizerische paläontologische Abhandlungen*, 110: 1–205; Basel.
- SCHMÖLLER, R. (1991): The Permo-Triassic of the Gartnerkofel-1 core (Carnic Alps, Austria): Remarks on the natural gamma ray log and density log. – In: HOLSER, W. T. & SCHÖNLAUB, H. P.: The Permian-Triassic boundary in the Carnic Alps of Austria (Gartnerkofel Region). – *Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt*, 45: 209–211; Wien.
- SCHOLGER, R., MAURITSCH, H. J. & BRANDNER, R. (2000): Permian-Triassic boundary magnetostratigraphy from the Southern Alps. – *Earth and Planetary Science Letters*, 176: 495–508; Amsterdam.
- SCHÖLLER, M. (1967): Petrographie und Feinstratigraphie des Unteren Muschelkalks in Südniedersachsen und Nordhessen. – *Sedimentary Geology*, 1: 353–401; Amsterdam.
- SCHULZ, E. & HEUNISCH, C. (2005): Palynostratigraphische Gliederungsmöglichkeiten des deutschen Keupers. – In: DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (Hrsg., Koordination: BEUTLER, G.; Redaktion: BEUTLER, G., HAUSCHKE, N., NITSCH, E. & VATH, U.) (2005): Stratigraphie von Deutschland IV – Keuper. – *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, 253: 43–49; Frankfurt a. M.
- SCHULZ, M. G. (1972): Feinstratigraphie und Zyklengliederung des Unteren Muschelkalks in N-Hessen. – *Mitteilungen des Geologisch-Paläontologischen Instituts der Universität Hamburg*, 41: 133–170; Hamburg.
- SHELL (1980): Standard legend, time stratigraphic table. – *Shell International Petroleum Maatschappij; 's Gravenhage*.
- SIMON, T. (1988): Geologische und hydrogeologische Ergebnisse der neuen Solebohrung Bad Rappenau, Baden-Württemberg. – *Jahreshefte des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg*, 30: 479–510; Freiburg i.Br.
- SIMON, T., ENGESSER, W. & LEIBER, J. (1992): Stratigraphie des Unteren Muschelkalks im nördlichen Kraichgau. – *Jahreshefte des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg*, 34: 271–290; Freiburg i. Br.
- STD 2002 (DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION, Hrsg.; Koordination und Gestaltung: MENNING, M. & HENDRICH, A.) (2002): Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2002. – Potsdam (GeoForschungsZentrum), Frankfurt a. M. (Forschungsinstitut Senckenberg). <http://www.stratigraphie.de/>

- STD 2016 (DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION, Hrsg.; Redaktion, Koordination und Gestaltung: MENNING, M. & HENDRICH, A.) (2016): Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2016. – Potsdam (Deutsches GeoForschungsZentrum). <http://www.stratigraphie.de/>
- STDK 2012 (DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION, Hrsg.; Koordination und Gestaltung: MENNING, M. & HENDRICH, A.) (2012): Stratigraphische Tabelle von Deutschland Kompakt 2012; Potsdam (Deutsches GeoForschungsZentrum). A4 plan und gefalzt <http://www.stratigraphie.de/>
- STDK 2017 (DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION, Hrsg.; Koordination und Gestaltung: MENNING, M. & HENDRICH, A.) (2017): Stratigraphische Tabelle von Deutschland Kompakt 2017; Potsdam (Deutsches GeoForschungsZentrum). A4 plan und gefalzt <http://www.stratigraphie.de/>
- STORCK, J.-C., BRACK, P., WOTZLAW, J.-F. & ULMER, P. (2019): Timing and evolution of Middle Triassic magmatism in the Southern Alps (northern Italy). – *Journal of the Geological Society of London*; London. <http://jgs.lyellcollection.org/>
- SUBKOMMISSION PERM-TRIAS (2011): Beschlüsse der Deutschen Stratigraphischen Kommission zu Perm und Trias 1991–2010. – *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 162 (1): 1–18; Stuttgart.
- SUMMESBERGER, H. & WAGNER, L. (1972): Der Stratotyp des Anis (Trias). Geologische Beschreibung des Profils von Großreifling (Steiermark). – *Annalen des Naturhistorischen Museums in Wien*, 76: 515–538; Wien.
- SZULC, J. (1993): Early Alpine tectonics and lithofacies succession in the Silesian part of the Muschelkalk Basin. A synopsis. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): *Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991*. – Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde Württemberg, 2: 19–28; Korb (Goldschneck).
- SZURLIES, M. (2001): *Zyklische Stratigraphie und Magnetostratigraphie des Unteren Buntsandsteins in Mitteldeutschland*. – Dissertation Universität Halle-Wittenberg: 116 S.; Halle.
- SZURLIES, M. (2007): Latest Permian to Middle Triassic cyclo-magnetostratigraphy from the Central European Basin, Germany: Implications for the geomagnetic polarity timescale. – *Earth and Planetary Science Letters*, 261 (3/4): 602–619; Amsterdam.
- SZURLIES, M., BACHMANN, G. H., MENNING, M., NOWACZYK, N. R. & KÄDING, K.-C. (2003): Magnetostratigraphy and high-resolution lithostratigraphy of the Permian-Triassic boundary interval in Central Germany. – *Earth and Planetary Science Letters*, 212: 263–278; Amsterdam.
- TONG, J.-N., ZAKHAROV, Y. D., ORCHARD, M. J., YIN, H.-F. & HANSEN, H. J. (2004): Proposal of Chaohu section as the GSSP candidate of the Induan-Olenekian boundary. – *Albertiana*, 29: 13–28; Utrecht.
- TÖRÖK, Á. (1993): Storm influenced sedimentation in the Hungarian Muschelkalk. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): *Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991*. – Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, 2: 133–142; Korb (Goldschneck).
- TOZER, E. T. (1984): The Trias and its ammonoids: The evolution of a time scale. – *Geological Survey of Canada, Miscellaneous Reports*, 35: 171 p.; Ottawa.
- TRUSHEIM, F. (1971): Zur Bildung der Salzlager im Rotliegenden und Mesozoikum Mitteleuropas. – Beihefte zum *Geologischen Jahrbuch*, 112: 51 S.; Hannover.
- TUCKER, R. D., BRADLEY, D. C., VER STRAETEN, C. A., HARRIS, A. G., EBERT, J. R. & McCUTCHEON, S. R. (1998): New U-Pb zircon ages and the duration and division of Devonian time. – *Earth and Planetary Science Letters*, 158: 175–186; Amsterdam.
- URLICHS, M. (1978): Über zwei alpine Ammoniten aus dem Oberen Muschelkalk SW-Deutschlands. – *Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Reihe B*, 39: 1–13; Stuttgart.
- URLICHS, M. (2014): A phylogenetic lineage of *Myophoria kefersteini* subspecies (Bivalvia) from the Late Ladinian to the Early Carnian (Triassic) in the Dolomites and Julian Alps (Italy). – *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*, 274: 187–207; Stuttgart.
- URLICHS, M. & MUNDLOS, R. (1985): Immigration of cephalopods into the Germanic Muschelkalk basin and its influence on their suture line. – *Lecture Notes in Earth Sciences*, 1: 221–236; Heidelberg (Springer).
- URLICHS, M. & TICHY, G. (2000): Correlation of the Bleiglanzbank (Gipskeuper, Grabfeld Formation) of Germany with Upper Ladinian beds of the Dolomites (Italy). – *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I*, 1998: 997–1007; Stuttgart.
- VAN EYSINGA, F. W. B. (1975): *Geological Time Table*. – Elsevier, 3rd Edition, wall chart; Amsterdam.
- VAN HINTE, J. E. (1976): A Jurassic time scale. – *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 60: 498–516.
- VISSCHER, H., BRUGMAN, W. A. & VAN HOUTE, M. (1993): Chronostratigraphical and sequence stratigraphical interpretation of the palynomorph record from the Muschelkalk of the Obernsees well, South Germany. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): *Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991*. – Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, 2: 145–152; Korb (Goldschneck).
- VÖRÖS, A., SZABÓ, I., KOVÁCS, S., DOSZTÁLY, L. & BUDAI, T. (1996): The Felsőörs section: A possible stratotype for the base of the Ladinian Stage. – *Albertiana*, 17: 25–40; Utrecht.
- VÖRÖS, A., BUDAI, T., HAAS, J., MÁRTON, E., PÁLFI, J. & SZABÓ, I. (2002): Stop 1 Felsőörs, Forrás-hegy (Forrás Hill). – *STS/IGCP 467 Field Meeting, Veszprém, 2002*: 70–77; Budapest (Geological Institute of Hungary, Hungarian Geological Society).
- VÖRÖS, A., BUDAI, T., KOVÁCS, S., PIROS, O. & SZABÓ, I. (2003): Stratigraphy. – In: VÖRÖS, A. (Ed.): *The Pelsonian Substage on the Balaton Highland (Middle Triassic, Hungary)*. – *Geologica Hungarica, Ser. Palaeontol.*, 55: 13–43; Budapest.
- WAGNER, R. (1897): Beitrag zur genaueren Kenntnis des Muschelkalks bei Jena. – *Abhandlungen der Königlich-Preussischen Geologischen Landesanstalt, N.F.* 27: 105 S., 7 Abb., 2 Taf.; Berlin.
- WEISSERT, H., JOACHIMSKI, M. & SARNTHEIN, M. (2008): Chemostratigraphy – concepts, definitions, and applications. – *Newsletters on Stratigraphy*, 42 (3): 145–179; Berlin.
- WOTZLAW, J.-F., BRACK, P. & STORCK, J.-C. (2018): High-resolution stratigraphy and zircon U-Pb geochronology of the Middle Triassic Buchenstein Formation (Dolomites,

- northern Italy): precession-forcing of hemipelagic carbonate sedimentation and calibration of the Anisian-Ladinian boundary interval. – *Journal of the Geological Society of London*, 175 (1): 71–85; London.
- ZAPFE, H. (1974): Die Stratigraphie der Alpin-Mediterranen Trias. – *Schriftenreihe der Erdwissenschaftlichen Kommission der Österreichischen Akademie der Wissenschaften*, 2: 137–144; Wien.
- ZHANG, R., JIN, Z.-J., LIU, Q.-Y., LI, P., HUANG, Z.-K., SHI, J.-Y., GE, Y.-J. & DU, K.-F. (2019): Astronomical constraints on deposition of the Middle Triassic Chang 7 lacustrine shales of the Ordos Basin, Central China. – *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 528: 87–98.
- ZÜHLKE, R. (2003): Model – Sub-Milankovitch forcing of the elementary cycles and the complete Milankovitch signal (precession, obliquity, eccentricity) in the large-scale cycle bundlings. – In: BECHSTÄDT, T., BRACK, P., PRETO, N., RIEBER, H. & ZÜHLKE, R.: *Triassic geochronology and cyclostratigraphy – a field symposium. Field trip to Latemar, September 14–16/17 2003.* – Guidebook: Part III: 46 p.; St. Christina/Val Gardena, Dolomites, Italy.
- ZÜHLKE, R., BECHSTÄDT, T. & MUNDIL, R. (2003a): Sub-Milankovitch and Milankovitch forcing on a model Mesozoic carbonate platform – the Latemar (Middle Triassic, Italy). – *Terra Nova*, 15 (2): 69–80.
- ZÜHLKE, R., BECHSTÄDT, T. & MUNDIL, R. (2003b): Integrated cyclostratigraphy of the Latemar carbonate platform (Southern Alps). – In: *Triassic geochronology and cyclostratigraphy – a field symposium (St. Christina, Italy, Sept. 2003), Programme & Abstracts: 28*; Zürich (Eidgenössische Technische Hochschule, Department Erdwissenschaften).
- ZWENGER, W. & KOSZINSKI, A. (2009): Die lithostratigraphische Gliederung des Unteren Muschelkalks von Rüdersdorf bei Berlin (Mittlere Trias, Anisian). – *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge*, 16 (1/2): 29–53; Cottbus.

Manuskript eingegangen: 09.02.2019

Annahme zur Veröffentlichung: 20.09.2019

HAGDORN, H. (2020): Paläobiogeographie des Mitteleuropäischen Beckens in der Frühen und Mittleren Trias und Fauneneinwanderung ins Muschelkalkmeer. – In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Koordination und Redaktion: HAGDORN, H., SIMON, T., für die Subkommission Perm-Trias): Stratigraphie von Deutschland XIII. Muschelkalk. – Schriftenr. Dt. Ges. Geowiss., 91: S. 111-123, 1 Abb.; Berlin.

1.4

Paläobiogeographie des Mitteleuropäischen Beckens in der Frühen und Mittleren Trias und Fauneneinwanderung ins Muschelkalkmeer

[Palaeobiogeography of the Central European Basin in the Early and Middle Triassic and faunal immigration into the Muschelkalk Sea]

Hans Hagdorn

Muschelkalkmuseum, Schloss-Str. 11, D-74653 Ingelfingen, e-mail: encrinus@hagdorn-ingelfingen.de

Kurzfassung

Die Migrationsbeziehungen mariner mitteltriassischer Floren und Faunen zwischen den tethyalen Schelfbereichen und dem Mitteleuropäischen (Germanischen) Becken werden nach ihrer zeitlichen Abfolge vom Olenekium (basale Röt-Formation) bis zum Ende der Muschelkalk-Ablagerung (Ladinium, Ende Fassanium) beschrieben. Die erste Einwanderung erfolgte im Röt und basalen Muschelkalk aus der Paläotethys durch die Ostkarpatenpforte, dann ab dem späten Bithynium (Untere Wellenkalk, Jena-Formation; in Polen Obere Gogolin-Formation) aus der Neotethys durch die Schlesisch-Mährische Pforte. Tethyale Faunenelemente im Unteren Muschelkalk von Südwestdeutschland belegen eine zeitweilige Verbindung über die Westalpen (Alemannische Pforte, Schweizer Pforte). Im frühen Illyrium (Mittlerer Muschelkalk) war der Wasseraustausch mit der Tethys eingeschränkt und Floren und euryhaline Faunen erreichten episodisch von Südosten her zentrale Beckenbereiche. Mit der Reaktivierung der Alemannischen Pforte im späten Illyrium gelangten ab dem obersten Mittleren Muschelkalk bis in die *enodis*-Zone stenohaline Faunenelemente in den axialen Bereich des Südlichen Randbeckens und hinterließen hier die ökostratigraphischen Leitbänke. Marine Verhältnisse hielten am längsten (bis in die *semipartitus*-Zone) von Lothringen über die Fränkische und die Hessische Senke bis Süd-Niedersachsen an, während das Hauptbecken im Norden zunehmend verbrackte.

Abstract

Migrations of Middle Triassic marine floral and faunal elements between the Tethyan shelf realm and the Central European (Germanic) Basin are described according to their temporal sequence from Olenekium (basal Röt Formation) to the end of the Muschelkalk

deposition (Ladinian, end of Fassanian). The earliest immigration took place in Röt and basal Muschelkalk times from the Palaeo-Tethys via the East Carpathian Gate, and from the late Bithynian (Lower Wellenkalk, Jena Formation; in Poland Lower Gogolin Formation) onward from the Neo-Tethys via the Silesian-Moravian Gate. Tethyan faunal elements in the Lower Muschelkalk of Southwest Germany give evidence for an additional marine connection via the Western Alps (Alemannic Gate, Swiss Gate). In early Illyrian times (Middle Muschelkalk), the water exchange with the Tethys was restricted and floras and euryhaline faunas episodically reached from Southeast as far as to central parts of the Germanic Basin. During a reactivation of the Alemannic Gate in late Illyrian times, stenohaline faunal elements invaded into the axial part of the Southern Marginal Basin from the top of the Middle Muschelkalk to the *enodis* biozone leaving the ecostratigraphic marker beds that form the frame of the Upper Muschelkalk lithostratigraphy. Marine conditions persisted longer than elsewhere (as late as the *semipartitus* Zone) from Lorraine through the Franconian and the Hessian depressions to southern Lower Saxony, while the North German Basin became gradually brackish.

Schlüsselwörter: Faunen- und Floren-Migration, Mitteltrias, Zentraleuropäisches Becken, Germanisches Becken, Tethys

Keywords: faunal and floral migration, Middle Triassic, Central European Basin, Germanic Basin, Tethys

1. Einführung

Aus dem tektonischen Geschehen erklären sich die Faunenbeziehungen zwischen Zentraleuropäischem Becken und westlicher Tethys, wie sie sich i. W. aus mikropaläontologischen Befunden, aber auch aus der Verbreitung von epibenthischen Makrofaunen, Wir-

beltieren und Dasycladaceen ergeben. Die Wanderungsbewegungen der triassischen Faunen im Tethys- und Peritethys-Raum folgten generell abgesenkten Krustenbereichen. Die Rekonstruktion des tektonischen Geschehens erklärt demnach paläobiogeographische Beziehungen, während die raum-zeitliche Verbreitung von Faunen und Floren, wie sie sich aus der Biostratigraphie ergibt, andererseits die zeitliche Abfolge der geotektonischen Vorgänge erhellt. Bei der Rekonstruktion dieser Szenarien gilt es natürlich Zirkelschlüsse zu vermeiden. Ihre Genauigkeit hängt von der Auflösungsgenauigkeit der biostratigraphischen Zonierung und der geographischen und stratigraphischen Reichweite der Indexfossilien in den westlichen Tethys-Schelfgebieten ab.

Solange der germanische Muschelkalk unter vollmarinen Bedingungen abgelagert wurde – am längsten im axialen Bereich des Südlichen Randbeckens von Lothringen bis Südniedersachsen – entwickelten sich unter den stenohalinen Faunenelementen wie Conodonten, Cephalopoden, eingeschränkt auch Crinoiden und Ostrakoden, phylogenetische Reihen mit Formen von relativ kurzer Lebensdauer, die sich als Indexfossilien gleichermaßen wie als Indikatoren für paläobiogeographische Beziehungen eignen. Im höheren Oberen Muschelkalk, wo diese Gruppen aus faziellen Gründen aussetzen oder endemische Entwicklungen einschlagen, gewinnen dann insbesondere die euryöken, v.a. die euryhalinen Faunen an Bedeutung. Dazu gehören Wirbeltiere (HAGDORN & RIEPPEL 1999, RIEPPEL 2000, RENESTO et al. 2014) und manche Muscheln. Solchen Ubiquisten gelang die Verbreitung über das Muschelkalkmeer auch zu Zeiten, als dort keine vollmarinen Verhältnisse mehr herrschten.

Bereits um die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert bestand Klarheit darüber, dass in der „germanischen Binnenmeerfazies“ im Unteren Muschelkalk die meisten Gemeinsamkeiten mit alpinen Faunen in Oberschlesien bestehen, im Oberen Muschelkalk dagegen in Südwestdeutschland und Ostfrankreich (z. B. FRAAS 1899, FRECH 1903). Als Verbindungswege wurden demnach Meeresstraßen rekonstruiert, durch welche Faunen und Floren ins Germanische Becken einwanderten, im Unteren Muschelkalk über Oberschlesien, im Oberen Muschelkalk über die Westalpen. So liest man bei TORNQUIST (1912:127), der Ceratiten germanischer Affinität von Sardinien, aus den vicentinischen Voralpen und aus Südfrankreich (Toulon) kannte, dass „zur Zeit des Oberen Muschelkalkes eine recht ausgiebige Verbindung mit dem Ozean, welche unmöglich über Schlesien und Ungarn geführt haben kann, sondern vermutlich in den heutigen Westalpen südlich Grenoble bestand“. Bei DIENER (1915: 32) heißt es entsprechend: „Das

Meer [...] war ein Binnenmeer, das mit der alpinen Region der Tethys nur an zwei Stellen – durch die Schlesische Pforte im Osten und durch die Straße von Grenoble über das Rhonetal im Westen – in direkter Verbindung stand“. Nach kenntnisreichen Vergleichen von Fazies und Faunen im alpinen und germanischen Bereich, aber unter z. T. spekulativen Überlegungen zu Klima und Strömungsverhältnissen lokalisierte DEECKE (1922) den Einwanderungsweg ins „germanische Muschelkalk-Binnenmeer“ zur Zeit des Unteren Muschelkalks ausschließlich durch die „schlesische Pforte“. Für die Zeit des Mittleren Muschelkalks nimmt er die Schließung der schlesischen Pforte an, für den Oberen Muschelkalk eine Öffnung im „Süden, entweder im Gebiet der Alpen oder im Bereich des Rhonetals, d. h. von dem zweiten, dem spanischen Binnensee her“ (DEECKE 1922: 13); auf den folgenden Seiten schreibt er dann mehrfach von der „Rhonestraße“.

Die Bezeichnung „Burgundische Pforte“ für den westlichen Einwanderungsweg tethyalen Faunen ins Zentraleuropäische Becken findet sich in der deutschen geologischen Literatur erstmals bei BRINKMANN (1926), der von der „Schließung der oberschlesischen Meeresstraße gegen Ende des Wellenkalk und [...] der] Öffnung der Burgundischen Pforte im Mittleren und vor allem im Oberen Muschelkalk“ schreibt. Dies hat jedoch Verwirrung verursacht, denn „Burgundische Pforte“ ist eine in Deutschland gebräuchliche kultur-geographische Bezeichnung für die ca. 30 km breite Senke zwischen Vogesen und Jura (franz. *Trouée de Belfort, Porte d'Alsace*), also eine geologisch wesentlich jüngere Struktur, die in der Trias noch nicht existierte. Auch war dabei die historische Freigrafschaft Burgund (Hochburgund, Franche Comté) nicht klar von dem westlich der Saône gelegenen Herzogtum Burgund getrennt, so dass für französische Geologen eine „Burgundische Straße“ weiter westlich verortet wird, wo mitteltriassische Sedimente aber vollständig dolomitisiert sind oder in Sandfazies übergehen, wo damit auch keine Verbindung zur Tethys bestanden haben kann (Kap. 10.2). „Burgundische Pforte“ oder „Burgundische Straße“ hat sich zwar in der deutschen geologischen Literatur verfestigt doch sollte der Begriff als Bezeichnung für eine triaszeitliche Struktur vermieden werden, wie weiter unten im Einzelnen gezeigt wird.

Der folgenden Darstellung liegen für das Geschehen in West- und Mitteleuropa i. W. die Arbeiten von KOZUR (1974a, b, 1975, revidiert 1999), COUREL et al. (1984), ZIEGLER (1988, 1990), FEIST-BURKHARDT et al. (2008a) und BACHMANN et al. (2010) zugrunde. Zusammenfassende Darstellungen von Paläogeographie und Faziesverteilung finden sich in den Atlaswerken zum nördlichen Nordseebereich (Millenium-Atlas,

EVANS et al. 2003) und zum südlich anschließenden Südlichen Permbecken, d. h. dem Hauptbecken der Mitteleuropäischen Senke (BACHMANN et al. 2010). Für den Tethysraum wurden die Arbeiten von BRANDNER (1984), KOVACS (1992) und MOSTLER (1993) sowie der Tethys-Atlas von DERCOURT et al. (2000) herangezogen. Zusammenfassende Darstellungen der Entwicklung im Zentraleuropäischen Becken und deren sequenzstratigraphische Korrelation mit benachbarten Peritethys-Bereichen geben für den Unteren Muschelkalk GÖTZ & GAST (2010) und GÖTZ & FEIST-BURKHARDT (2012), für den Oberen Muschelkalk FRANZ et al. (2015). Die Einstufung nach der chronostratigraphischen Gliederung folgt KOZUR & BACHMANN (2005, 2008) unter Berücksichtigung der Daten von SZULC (1999, 2000), BEUTLER & SZULC (1999), NARKIEWICZ & SZULC (2004) sowie von MENNING et al. (2005).

2. Migrationsbeziehungen von Faunen und Floren

Im Späten Perm öffnete sich durch Rifting im arktisch-nordatlantischen Bereich, verbunden mit einem eustatischen Meeresspiegelanstieg, eine Verbindung von den marinen arktischen Becken zu den epikontinentalen Becken West- und Mitteleuropas (Nördliches Permbecken; Südliches Permbecken = Zentraleuropäisches Becken; ZIEGLER 1990, GLENNIE et al. 2003). Dabei führte eine von der Barentssee vorrückende Flutung dort bei verstärkter Subsidenz zu marinen bzw. evaporitischen Verhältnissen (Zechsteintransgression). Foraminiferen und Ostrakoden tethyalen und uralischen Ursprungs im basalen Zechstein Polens und Litauens belegen allerdings, dass es bereits im Späten Perm im Osten – zumindest zeitweilig – auch eine Verbindung zur Tethys gab (PERYT et al. 2010). Die Zechstein-Faunen Englands belegen dagegen ausschließlich boreale Herkunft.

In der Folge lagerten sich im Zentraleuropäischen Becken während der Trias im Wechselspiel von Meeresspiegelschwankungen, klimabedingter fluvialer Eintragung von Siliziklastika sowie Subsidenz die Sedimente der dreigliederten Germanischen Trias ab: in der Frühen Trias überwiegend rote, terrigene Klastika des Buntsandsteins, im Anisium und im frühen Ladinium Tonmergel, Karbonate und Evaporite des Muschelkalks und im späten Ladinium, Karnium und Norium Tonmergel, bunte Playasedimente des Keupers mit Sandsteinen nordeuropäischer Herkunft (Lettenkeupersandsteine, Schilfsandstein) und vom Vindelizisch-Böhmischen Massiv (Benker Sandstein, Kieselsandstein, Stubensandstein). Im Nordteil des Beckens und im gesamten Nördlichen Permbecken fehlt die marine Ausbildung der Mitteltrias (EVANS et al. 2003, MCKIE 2014).

2.1 Frühe Trias (Indusium, Olenekium)

Die Verbindung zur Arktis zu Beginn der Trias (Indusium) galt lange als geschlossen und das Zentraleuropäische Becken als weitgehend abgeriegelt vom Meer. Allerdings sprechen paläontologische Daten durchaus für Faunenimmigrationen. So nimmt PIENKOWSKI (1989) an, dass im Unteren und Mittleren Buntsandstein der nördliche und westliche Teil des Zentraleuropäischen Beckens durch marine Ingressionen beeinflusst war, was er auf einen globalen Meeresspiegelanstieg zu Beginn der Trias zurückführt. Dies wird gestützt durch die von BECKER (2005) beschriebenen Faziesmuster im Buntsandstein Polens sowie petrologische und sedimentologische Anzeichen (SZULC 2007a). Laufende Untersuchungen zur Frühen Trias Nordwest-Polens (Bohrung Gorzow Wielkopolski, Szulc in Vorbereitung) belegen marine Verhältnisse im Indusium und auch im Olenekium. Häufig treten marine Faunen aus Foraminiferen, Kleingastropoden und Mikrokonchen auf, die der marinen Fauna der südalpiner Werfen-Formation sehr ähnlich sind, allgegenwärtig besonders in oolithischen Sedimenten (z. B. FOSTER et al. 2017). Auch das Vorkommen der kleinen Schwamm-Mikroben-Konstruktionen in frühtriassischen Stromatolithen des Harzvorlands und Nordwest Polens (SZULC 2007b) bestätigt, dass signifikante marine Einflüsse das Peritethys Becken bereits in der Frühen Trias erreichten. Nach neuesten palynologischen Untersuchungen durch HEUNISCH & RÖHLING (2016) belegen Acritarchen in der höheren Bernburg- und besonders in der Volpriehausen-Formation im gesamten Zentraleuropäischen Becken eingeschränkt- bis vollmarine Verhältnisse. Meeresvorstöße seien demnach im Unteren und Mittleren Buntsandstein bedeutender gewesen, als bisher angenommen wurde. Neben einer möglichen Nordverbindung gibt es auch Hinweise auf eine Verbindung im Südosten. So wurden im Bereich der Ostkarpatenpforte (Galizien) im Mittleren Buntsandstein tethyale Foraminiferen gefunden (MILEWSKA & MORYC 1981).

Im Nordseebereich setzte sich während des Buntsandsteins die Subsidenz des Beckens fort, wurde aber zunehmend durch eine Anzahl von Gräben und Trögen modifiziert (BACHMANN et al. 2010, RÖHLING & LEPPER 2013; Kap. 1.2). Für den späteren Ablagerungsraum des Muschelkalks sind dies im Nordseebereich Viking-Graben, Zentralgraben und Horn-Graben, nach Südosten der Norddeutsch-Polnische Trog mit Westdorf- und Glückstadt-Graben und im Westen das System von der Hessischen Senke zum Burgundischen Trog, welches über das Rhonetal mit dem Biskaya-Rift und der westlichen Tethys verbunden ist. Diese Strukturen stehen in Zusammenhang mit den Megarifts, die Pangaea in Nord-Süd- und Ost-West-Richtung aufbrechen ließen.

Mit der graduellen Versenkung der Hochgebiete im mittleren Nordseebereich schlossen sich Nördliches und Südliches Permbecken (ZIEGLER 1990) zum Zentraleuropäischen (Germanischen) Becken zusammen, das sich von der nördlichen Nordsee bis Südpolen erstreckte (McKIE 2014). Außerdem entwickelten sich z. T. tektonisch gesteuerte Senkungszone im Bereich der langgestreckten Schwellenzone, die das Südliche Permbecken im Zechstein noch weitgehend von der Tethys getrennt hatte (Zentraleuropäisches Hochland, Vindelizisch-Böhmisches Massiv), und ermöglichten so die Transgressionen der Tethys durch wechselnde marine Straßen nach Norden ins Zentraleuropäische Becken, das zum teilweise abgeschnürten Becken („semi-enclosed basin“) wurde.

Im Buntsandstein wurden unter kontinentalen bis lakustrinen, brackischen bis hypersalinaren Bedingungen bis über 1200 m mächtige Sedimente aus spätvariskischen Gesteinen abgelagert, die unter Monsuneinfluss von Flusssystemen ins Becken eingetragen wurden, besonders vom Gallisch-Ardennischen und vom Vindelizisch-Böhmischen Massiv, durch die Eifeler Nord-Süd-Zone und die Hessische Senke nach Norden (PAUL et al. 2008, RÖHLING & LEPPER 2013, TIETZE & RÖHLING 2013, HEUNISCH & RÖHLING 2016). Zur Zeit des Unteren Buntsandsteins folgte eine erste Transgression dem sich schnell absenkenden Norddeutsch-Polnischen Trog. Während Tiefstandphasen des Meeresspiegels kam es in Schwellengebieten mit geringen Absenkungsraten (Hunte-, Eichsfeld-Altmark-, Ostbrandenburg- und Rügenschwelle) zu Abtragung (Hardegsen-Diskordanz, Solling-Diskordanz), während in den Trögen bei anhaltender Subsidenz kontinuierlich sedimentiert wurde (RÖHLING & LEPPER 2013). Ein Gutachter (E.N.) gibt dabei zu bedenken, dass das Becken meistens geschlossen war und die Abtragung eher als Ausdruck tektonischer Impulse zu verstehen ist (Reliefrhöhung durch Subsidenzimpulse in den Becken). Ein Meeresspiegel-gesteuerter Erosionsprozess hätte vornehmlich die Talwege der Flüsse angegriffen, also die Senken.

2.2 Frühes Anisium (Aegaeum): Oberer Buntsandstein (Folge s7)

Im ausgehenden Olenekium/frühen Anisium (Folge s7-2; Sequenz An1, SZULC 2000; vgl. Kap. 6.1) transgredierte die Tethys durch die Ostkarpatenpforte, eine wiederbelebte variskische Grabenstruktur, in den Norddeutsch-Polnischen Trog. Diese marine Straße, die nach SENKOWICZOWA (1961) und KOZUR (1974b) vermutlich entlang dem Ostrand der Karpaten weiter nach Südosten führte, verband das Zentraleuropäische Becken direkt mit der asiatischen Faunenprovinz der Paläotethys. Dagegen bezweifelt KOVACS (1992) die

Existenz dieses Weges und nimmt eine Verbindung außerhalb der Karpaten, über die Prä-Dobrukscha an. In Polen wurden dabei die fossilreichen marinen Karbonate des Rötldolomits bzw. des Rötalks abgesetzt. Crinoidenreste wurden im oberen Rötalk als früheste tethyale Einflüsse in Bohrungen im Karpatenvorland (MORYC 1971) und im südlichen Oberschlesien (ALEXANDROWICZ & SIEDLECKI 1960) nachgewiesen. In Ostthüringen korrelieren diese Karbonate mit bunten Tonsteinen mit einzelnen fossilreichen Dolomitsteinbänken (Myophoriendolomite) der Göschwitz-Subformation. SZULC (2000), der die ganze Röt-Formation noch ins Olenekium einstuft, korreliert den Rötalk allerdings mit den karbonatfreien braunroten Tonsteinen mit Sulfat der Karsdorf-Subformation (s7-3). Einzelne Dolomitsteinbänke in der Göschwitz-Subformation enthalten im Raum Jena marine Formen, die auch im südpolnischen Rötalk häufig vorkommen, nämlich die Muscheln *Costatoria costata*, *Pseudocorbula subundata*, *Bakevellia costata*, den Cephalopoden *Beneckeia tenuis*, außerdem Holothurien (KOZUR 1974a, b) und marine Reptilien (HAGDORN & RIEPPEL 1998). Eine noch diversere Mollusken- und Wirbeltierfauna aus oolithischen Gipssteinen der ostthüringischen Folge s7-2 beschrieb SINGER (2014). Weiter nach Westen setzen die fossilführenden Karbonate aus und gehen in bunte Tonsteine mit Halit über (Röt 2), nach Südwesten (Franken, Baden-Württemberg) in bunte Klastika der Plattensandstein-Formation. Der marine Einfluss nimmt also mit wachsender Entfernung von der Verbindungspforte nach Westen generell ab. Die Halitverbreitung zeigt jedoch, dass die Röt-Transgression die axialen Abschnitte der Hessischen und auch der Thüringischen Senke noch erreicht hat (RÖHLING 2013: Abb. 8.1.2-2). In der frühen Folge s7-4 treten sowohl im zentralen Norddeutschen Becken als auch in der Thüringischen Senke erneut Sulfatgesteine auf (Gleina-Subformation, vgl. auch LEPPER et al. 2013), während in Schlesien die Entwicklung vom Rötalk in die Gogolin-Formation mit euhalinen Faunen durchgängig marin verlief.

Die Vorstöße mariner Faunen in der Folge s7-2 (Assemblagezone mit *Costatoria costata* und *Beneckeia tenuis*) wurden mit der Badia-Transgression in den Alpen korreliert, die in der oberen Werfen-Formation (Cencenighe-Member) relativ diverse marine Faunen enthält und mit Salinarentwicklungen im jüngsten Olenekium und basalen Anisium ihr Ende findet.

Aufgrund palynologischer Daten wiesen GISLER et al. (2007) für die Zentralschweizer Mels-Formation und den Rötldolomit frühanisisches Alter nach und erkennen darin eine Südost-Nordwest gerichtete, heterochrone, vom Aegaeum bis ins Pelsonium verlaufende marine Transgression auf den Südrand der Vindelizischen Schwelle, lassen aber offen, ob bereits

eine Passage ins Germanische Becken existierte. Das Zentralschweizer Gebiet um das Aarmassiv lag demnach in der Frühen Trias an der Nordküste der Tethys und nicht am Südrand des Germanischen Beckens. Der basale Untere Muschelkalk (Wellendolomit) der Nordschweiz hat nach Untersuchungen von Palynomorphen und Conodonten durch FEIST-BURKHARDT et al. (2008b) und GÖTZ & GAST (2010) gleichfalls frühanisches Alter und ist damit etwas älter als die nördlich angrenzenden Gebiete in Deutschland. Damit ist eine Besiedelung des schweizerischen und süddeutschen Unteren Muschelkalks von Nordosten durch die östlichen Pforten unwahrscheinlich, sondern die Fauneneinwanderung erfolgte durch eine westliche Pforte, wie sie von EINSELE & SCHÖNENBERG (1964) durch die Alpenrhein-Depression und von SZULC (2000) als „Western Gate“ angenommen wurde. Statt dieses Begriffs wurde von BACHMANN et al. (2010) „Alemannic Gate“ eingeführt. Dafür sprechen verschiedene Faunenelemente des süddeutschen Unteren Muschelkalks (s.u.).

2.3 Mittleres Anisium (frühes Bithynium): Oberer Buntsandstein (Folge s7-4) bzw. in Polen Unterer Muschelkalk (Untere Gogolin-Formation)

Mit der Muschelkalk-Transgression in der Unteren Gogolin-Formation, welcher westlich der Oder die Myophorienplatten der Folge s7-4 (Dornburg-Subformation) entsprechen, dringt im frühen Bithynium marine Karbonatablagerung bis Südthüringen nach Westen vor, jedoch nicht bis Süddeutschland. Crinoiden (*Dadocrinus*, *Holocrinus*) in der Gogolin-Formation Schlesiens und an der Basis der Myophorienschichten in Brandenburg zeigen nun vollmarine Verhältnisse für den östlichen Beckenteil an, während weiter gegen Westen eine Salinitäts- und Faziesbarriere die Verbreitung stenohaliner Faunen noch beeinträchtigte (Kap. 8.1: Abb. 1). Die Einwanderung dieser Faunen erfolgte nach KOZUR (1974a, b) über die Ostkarpatenpforte aus der asiatischen Triasprovinz, von wo auch die ersten tethyalen Conodonten bis weit ins zentrale Germanische Becken vordringen konnten (NARKIEWICZ & SZULC 2004), während sie im austroalpinen Faunenbereich der Tethys erst später einsetzen. Dort verhinderte nach BRANDNER (1984) und MOSTLER (1993) ein breiter Schelf (Zentrale Schwellenzone) mit einer durchgehenden Karbonatplattform die Einwanderung pelagischer Mikrofaunen und Cephalopoden. Crinoiden und andere Makrobenthonten kommen jedoch im frühen Bithynium (*Dadocrinus*-Zone Schlesiens, der Nord- und Südalpen und der süd-ungarischen Trias (Mecsek-Berge) bei bemerkenswerter Gleichförmigkeit der Fazies vor (HAGDORN et al. 1996, HAGDORN et al. 1998).

Die karbonatischen Myophorienplatten der Folge s7-4 mit mariner Muschelfauna (dominierende Form jetzt *Myophoria vulgaris*) und Cephalopoden (*Beneckea buchii*), die bis Südthüringen reichen, aber nur bis Brandenburg Crinoiden (*Dadocrinus*) enthalten, entsprechen der Unteren Gogolin-Formation in Polen. Sie repräsentieren den ersten transgressiven Vorstoß mariner Karbonatfazies bis Südthüringen und gehen weiter nach Westen und Süden in bunte, sandige Tonsteine mit Sandstein- und Gipslagen über, die aber bis nach Nordbaden euryhaline Muscheln enthalten (u.a. *Myophoria vulgaris*). Während in Schlesien die Abfolge im Hangenden weitgehend marin bestimmt bleibt, schalten sich über den karbonatischen Myophorienplatten von Brandenburg nach Westen graue und graugrüne Mergel mit Zellenkalken ein, die in Südthüringen dünne rote und violette Lagen und Gips führen (Kap. 8.1: Abb. 2 und 3). Diese Abfolge zeigt eine kurzfristige Regression an, die jedoch in der klastisch-tonigen Rotfazies weiter im Westen und in der durchgängig karbonatischen Fazies im Osten weniger deutlich in Erscheinung tritt. Die damit verbundene Kontroverse um die stratigraphische Stellung der Myophorienplatten wird in Kapitel 8.1 dargestellt. Die Untergrenze der Muschelkalkfazies verläuft demnach schräg durch die Zeit, lässt sich jedoch zeitlich wegen der geringen biostratigraphischen Auflösung nicht in der gewünschten Genauigkeit fassen (Kap. 8.1: Abb. 1).

Im frühen Bithynium fehlen in der austroalpinen und südalpinen Trias Conodonten und Ammonoideen, wie sie bis weit ins Zentraleuropäische Becken vorkommen. Daraus leitet KOZUR (1974b) ab, dass ihre Einwanderung nicht über eine Schlesisch-Moravische (= Oberschlesische) Pforte erfolgt sein kann. Gegen eine solche Verbindung im Bithynium, vermutlich auch schon im Aegeum und Olenekium sprechen auch die Holothurien- und Conodonten-freien Mergel und Kalkmergel der Oberen Gogolin-Formation Oberschlesiens, während gleichzeitig am Südrand des Heiligkreuzgebirges und im inneren Zentraleuropäischen Becken diese Faunenelemente reichlich auftreten. Das Zentraleuropäische Becken wurde demnach früher von Conodonten und Cephalopoden erreicht als die alpine Tethys. Eingewandert sind diese Faunen aus der asiatischen Trias, mit der nach KOZUR (1974b) und TRAMMER (1972) große Ähnlichkeit besteht. Die Faunen mariner Reptilien im westlichen Tethysraum bestätigen dieses Szenario (RIEPEL & HAGDORN 1997, RENESTO et al. 2014).

Die für die Zentralschweiz belegte frühanisische Transgression im Bereich des Aarmassivs über die Vindelizische Schwelle (GISLER et al. 2007) war zu dieser Zeit noch nicht tiefer in das Südliche Randbecken des Mitteleuropäischen Beckens vorgedrungen.

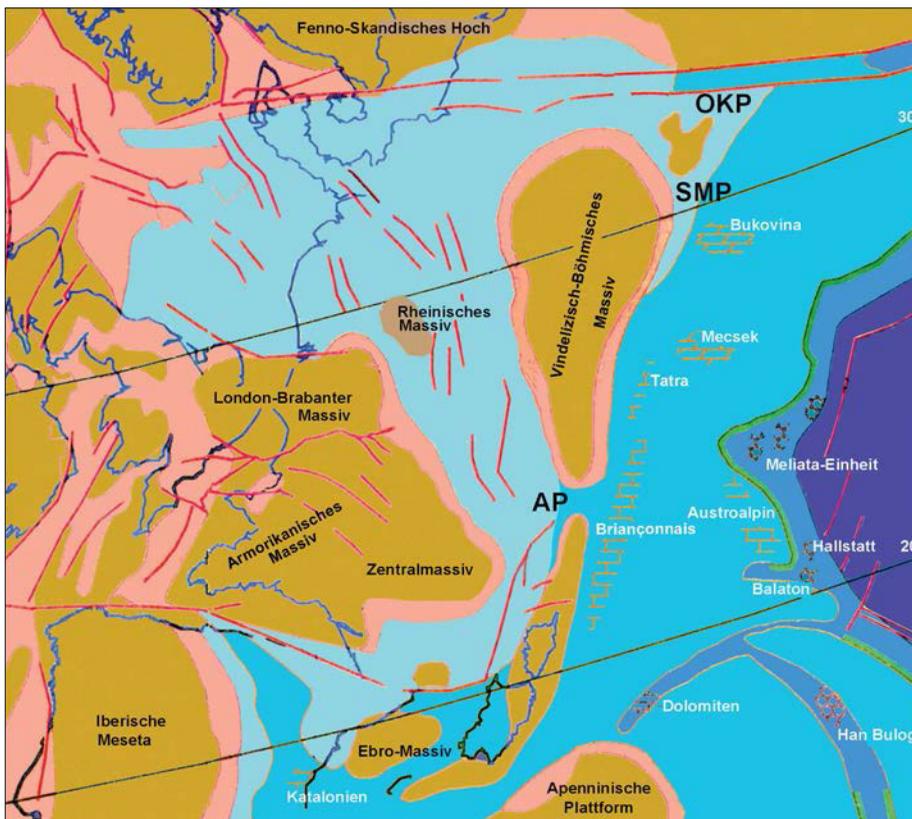


Abb. 1: Paläogeographische Lage des Zentraleuropäischen Beckens am nordwestlichen Rand der Tethys im Anisium. OKP – Ostkarpatenpforte, SMP – Schlesisch-Mährische Pforte (Oberschlesische Pforte), AP – Alemannische Pforte. Umgezeichnet und verändert nach DERCOURT et al. (2000).

2.4 Mittleres Anisium (spätes Bithynium) bis frühes Spät-Anisium (Illyrium): Unterer Muschelkalk (Folgen m1-m3)

Ab dem späten Bithynium (Folge m1: Unterer Wellenkalk der Jena-Formation, in Polen Obere Gogolin-Formation) lebten im Zentraleuropäischen Becken gleiche Ammonoideenfaunen wie auf dem Tethyschelf (Kap. 4.2). Von Südosten her öffnete sich eine Grabenstruktur, die den pelagischen Nordast der Neotethys und die Karbonatplattformen des Tethyschelfs durch die Schlesisch-Mährische Pforte (Oberschlesische Pforte) mit dem Zentraleuropäischen Becken verband. Faunen wanderten jedoch auch noch aus der Paläotethys zu. Von Süden her war jetzt außerdem die Verbindung über die Westalpen aktiv, was durch das Vorkommen von Brachiopoden (*Aulacothyris ostheimensis*), Cephalopoden (Häufigkeitsmaximum von *Beneckeia buchi*) und Korallen in der Freudenstadt-Formation des südlichen Baden-Württemberg und der Jena-Formation Mitteldeutschlands (Südthüringen, Osthessen, Oberfranken) angezeigt ist. Bei den Funden von Radiolarien in der Freudenstadt-Formation (Bereich der Spiriferinabank) des Wutachgebietes, die als Belege für eine westliche Pforte beschrieben wurden (BRAUN 1983) handelt es sich nach H. Kozur (schriftl. Mitt. 2011) um Formen, die pelsonischen Flachwasserfaunen

fehlen und die in Zweifel zu ziehen sind.

Für die als „Western Gate“ (SZULC 2000) oder Zentralschweizer Pforte, Schweizer Pforte, Alemannische Pforte (GISLER et al. 2007, FEIST-BURKHARDT et al. 2008b, BACHMANN et al. 2010, GÖTZ & GAST 2010, GÖTZ & FEIST-BURKHARDT 2012) bezeichnete Verbindung wird im Folgenden analog zu „Schlesisch-Mährische Pforte“ die Bezeichnung „Alemannische Pforte“ verwendet. M. Durand (schriftl. Mitt. 2017) weist auf die Wiederbelebung dieser Verbindung im Karnium hin, denn die einzige nennenswerte Makrofauna des Beaumont-Horizonts kommt im Gansingen-Dolomit der Nordschweiz vor.

Die Bezeichnung „Alpenrhein-Pforte“ lehnt E. Nitsch (schriftl. Mitt. 2016) ab und empfiehlt, „Burgundische Pforte“ beizubehalten, denn die Südwestverbindung habe nach der Faziesverbreitung des Unteren Muschelkalks deutlich westlich des Alpenrheins gelegen (vgl. Kap. 6.2), zumal der „Burgundische Permokarbon-Trog“ – nach M. Durand aus den o. g. Gründen gleichfalls ein unpassender Begriff – unter dem Rhonegraben und teilweise unter dem Faltenjura sich als eine alte Subsidenzzone in die Westschwäbische Senke (Schwäbische Straße) fortsetzte. Auch weist die Faziesverteilung in der Schweiz und in Ostfrankreich auf eine recht breite Verbindung unter der Westschweiz und Teilen Frankreichs hin. Unter Einfluss dieser Öffnung zur Neotethys ist auch die Fazies des höheren Unteren Muschelkalks am Südschwarzwald und in der Nordschweiz (Ühlingen-Subformation) kalkig und steht der Fazies der Jena-Formation nahe (Kap. 9.14). Zu den Verhältnissen zur Zeit des Oberen Muschelkalks s.u. Abschn. 2.6.

Diese zweite Sequenz anisischen Alters (An 2) setzt nach SZULC (2000) in der Folge m1a (basale Jena-Formation) mit dem Grenzgelbkalk ein, erreicht ihre maximale Transgression im Bereich der Oolithbänke und endet unter der Terebratelbank-Subformation (Folge m2b). Eingeschränkte Zirkulation führte im südwestlichen Beckenteil zur Ablagerung der auf dysareobe

Verhältnisse im Meeresboden weisenden Buchimergel und Buchidolomitmergel (häufig pyritisierte Ammonitennuclei und andere Kleinfäuna), die jedoch durchaus diverse vollmarine Faunen enthalten (Kap. 3.2).

Mit Gelbkalken an der Basis der Terebratelbänke setzt die Sequenz An 3 ein (SZULC 2000), die ihre maximale Überflutung mit der Terebratelbank-Subformation erreicht; damit fanden während des Unteren Muschelkalks marine Sedimente und diverse vollmarine Faunen in der Folge m2b ihre geographisch weiteste Verbreitung. Schaumkalkbank-Subformation und Karlstadt-Formation bzw. Karchowitz-Formation und Diploporendolomit Oberschlesiens (Folgen m3b bzw. m4), die bereits ins frühe Illyrium gehören, bilden den Hochstand. In dessen tieferen Abschnitten erreichten in den Korallen/Schwamm-Riffen des östlichen Beckenteils die Wirbellosen-Faunen die höchste Diversität im Muschelkalk insgesamt (ASSMANN 1937, BODZIOCH 1997, SZULC 2000).

Generell sind Fazies und Fauna während des Pelsoniums und frühen Illyriums im Zentraleuropäischen Becken, zumindest in dessen östlichem Teil, kaum von der tethyalen Trias verschieden, doch nimmt die Diversität mit der Entfernung von den Einwanderungspforten ab. Bis zum Ende des Pelsoniums (Terebratelbank-Subformation) ist der Meeresspiegel angestiegen, was einen großräumlichen Faunenaustausch ermöglichte. Oberschlesien gehörte mit seinen artenreichen Faunen in dieser Zeit ganz zur austroalpinen Faunenprovinz (KOZUR 1974a, b, TRAMMER 1979, SZULC 2000), während innerhalb des Zentraleuropäischen Beckens generell nach Westen mit der Fazies der Wellenkalke die marine Fauna zunehmend verarmt. Nur im flachmarinen Ablagerungsbereich der Rüdersdorf-Formation und in den zyklisch davon weiter nach Westen und Südwesten ausgreifenden Terebratelbänken und Schaumkalkbänken finden einige dieser Faunenelemente beckeneinwärts weitere geographische Verbreitung, verschwinden aber zyklisch immer wieder in den zwischenlagernden Wellenkalke. Bemerkenswert einheitlich sind während Pelsonium und frühem Illyrium Fazies und Fauna in der alpinen und ober-schlesischen Trias, wo großwüchsiges Epibenthos nach der end-paläozoischen Riffkrise erstmals wieder Riffstrukturen aufbaute (MORYCOWA 1988, SENOWBARY-DARYAN 1993, BODZIOCH 1997, HAGDORN et al. 1999, ZÜHLKE 2000). Die Conodontenfaunen des Unteren Muschelkalks haben nach NARKIEWICZ & SZULC (2004) generell tethyalen Charakter.

Für das früheste Spät-Bithynium/frühe Pelsonium nimmt KOZUR (1974b) den Fortbestand der Ostkarpatenpforte und den Kontakt zur asiatischen Faunenprovinz an, weil typische Tethysformen in der Subkarpatischen Depression noch häufiger sind als in Oberschlesien und weil der basale Cephalopoden-

horizont des Zentraleuropäischen Beckens (*Beneckeia buchi*, *Noetlingites strombecki*, „*Ceratites*“ *antedens*) etwas älter sei als die ältesten austroalpinen Cephalopoden (Kap. 4.2). Das Verbreitungsmuster dieser Ceratiten mit Häufigkeitsmaximum in Südwestdeutschland (URLICHS & MUNDLOS 1985) belegt jedoch, dass die Einwanderung in den südwestdeutschen Beckenteil genauso wie die der fraglichen Radiolarien, der Korallen und alpinen Brachiopoden über die Alemannische Pforte vom Neotethys-Südast erfolgt ist. Vom mittleren Pelsonium an (Folge m2b) belegen die artenreichen, stenohalinen Faunen Oberschlesiens, dass die Oberschlesische Pforte nun zur marinen Hauptverbindung mit der Tethys geworden ist; eine Verbindung zur asiatischen Faunenprovinz kann nach KOZUR (1974b) allerdings noch bis zum frühen Illyrium bestanden haben.

2.5 Spätes Anisium (frühes Illyrium): Mittlerer Muschelkalk (Folgen m4–m6)

Für die Folgen m4 bis m6 im frühen Illyrium wird ein abgesunkener Meeresspiegel angenommen, was im Mitteleuropäischen Becken eine Einschränkung des Wasseraustauschs mit der Tethys verursachte. Zwar führt der basale Mittlere Muschelkalk (Diploporendolomit) in Oberschlesien nahe den Verbindungswegen zur Tethys noch marine Faunen, doch verarmen diese mit einem Fazieswechsel zu dolomitischen Mergeln nach Westen und Norden zunehmend und bleiben in Brandenburg auf wenige Fossilbänke mit euryhalinen Muscheln und einer relativ diversen Wirbeltierfauna beschränkt (RAAB 1907, PICARD 1915). Im zentralen und westlichen Beckenteil gehen diese Karbonate in Evaporite und Dolomitmergel über. Die Ostkarpatenpforte dürfte zu dieser Zeit geschlossen gewesen sein, denn am Südrand des Heiligkreuzgebirges wurden im basalen Mittleren Muschelkalk fossiliehere, dünnplattige Kalke des Subdolomit-Horizonts abgelagert. Die Sulfat- und Halitablagerungen der südlichen Nordsee, Norddeutschlands und entlang der Achse der Hessischen Senke zeichnen die beckentiefsten Bereiche ab. Zu maximaler Mächtigkeit und Anzahl der Salinarzyklen kam es in den Gräben Norddeutschlands und der südlichen Nordsee (GAERTNER & RÖHLING 1993, GELUK 2005, BACHMANN et al. 2010; Kap. 9.1 und 10.4) sowie in der Nordschweiz (SIMON et al. 2009; Kap. 10.1).

Nach BRACK et al. (1999) könnten die Evaporite des Mittleren Muschelkalks mit der Abfolge von Richtigofen-Konglomerat und Contrin-Formation der Dolomiten korreliert werden. Eine Erosionsdiskordanz an der Basis des Richtigofen-Konglomerats belegt die Abtragung mächtiger Sedimente und zeigt eine starke Hebung an, welche auch die Verbindungen zwischen tethyalen und Germanischer Trias beeinflusst haben könnte. Biostratigraphisch gestützt werden diese Über-

legungen durch gleichartige Ammonitenfaunen des germanischen Muschelkalks und der Südalpen (Kap. 4.2). Diese sind: *Balatonites ottonis* und *Acrochordiceras* im Unteren Wellenkalk der Jena-Formation (Folge m1) und im Angolo-Kalk, *Judicrites* in der Schaumkalkbank-Subformation (m3b) und im Prezzo-Kalk, sowie *Flexoptychites* und *Nevadites* in der Meißner-Formation (*spinusus*-Zone; m8) und in der unteren Buchenstein-Formation (*secedensis*-Zone). Die großen Mächtigkeiten im frühen Illyrium des Zentraleuropäischen Beckens sind durch die rasche Ablagerung der Evaporite des Mittleren Muschelkalks bei starker Subsidenz zu erklären. Regionale tektonische Hebungen erklären auch plausibler als ein globales Absinken des Meeresspiegels, wieso die salinaren Abfolgen im spanischen und germanischen Muschelkalk unterschiedliches Alter haben (BUDUROV et al. 1993).

Im höheren Mittleren Muschelkalk verbrackte das zuvor stark übersalzene Mitteleuropäische Becken (KOZUR 1974b), weshalb zunächst nur euryhaline Arten zuwandern konnten. Diese Brackwasserfloren und -faunen, die im nordöstlichen Beckenteil im ganzen Oberen Muschelkalk vorkommen, entsprechen in ihrem Artenbestand weitgehend denen gleichalteriger Brackwasserareale im Prikaspi-Gebiet, mit denen sie nach KOZUR zumindest zeitweilig in Verbindung standen.

2.6 Spätes Anisium (spätes Illyrium) und Ladinium (Fassanium): Oberer Muschelkalk (Folgen m7–m9)

Im späten Illyrium (oberster Mittlerer und basaler Oberer Muschelkalk) kam es wieder zum Wasseraustausch über die Zentralschweiz und nun wanderten wieder stenohaline Faunen und Floren ein. Dasycladaceen und artenreiche Faunen, darunter ein nicht näher bestimmbarer *Arcestes*, sind bereits im höchsten Mittleren Muschelkalk bis Mittelwürttemberg vorgedrungen (HOHENSTEIN 1906), Dasycladaceen bis ins nördliche Lothringen (BENECKE 1898). Einzelne, häufig zu dunklem, oolithischem Hornstein mit Stromatolith- und Schwammstrukturen verkieselte Fossilbänke finden sich im Grenzbereich Mittlerer-Oberer Muschelkalk auch in weiter nördlich gelegenen Teilen des Südlichen Randbeckens (Kap. 9.7, 9.9, 9.13). Die Haupteinwanderungsschübe erfolgten in der transgressiven Phase vom Beginn des Oberen Muschelkalks (Folge m7) und hielten bis in die basale *enodis*-Zone (m8) an. Mit *Holocrinus doreckae* ist zum letzten Mal exotisches stenohalines Epibenthos eingewandert, gleichzeitig mit den tethyalen Ammonoideen *Parapinacoceras* und *Gymnites* (HAGDORN 1983, 1985, REIN & WERNEBURG 2010; Kap. 4.2). SZULC (2000) sieht in der Sedi-mentabfolge von den Dolomit- und Evaporitgesteinen der Folge m5 bis zum Grenzbonebed die erste ladinische Sequenz (La 1). Der Bereich maximaler Absen-

kungsraten hat sich nun vom Norddeutsch-Polnischen Trog weiter nach Westen, zur Fränkisch-Hessischen Senke verlagert, wo der Obere Muschelkalk regional über 100 m Mächtigkeit erreicht und bis zur *semipartitus*-Zone vollmarin und karbonatisch ausgebildet ist. Während der Folgen m8 und m9 wird auch Lothringen in diesen Bereich einbezogen, wo während der Folge m7 die Mächtigkeiten noch vergleichsweise geringer waren. So fehlen westlich des Rheins Äquivalente der Kraichgau- und der Hassmersheim-Subformation und die durchgängige Crinoidenkalkfazies setzt unmittelbar über Dolomitmergeln (Couches grises, Calcaires blancs) des Mittleren Muschelkalks ein, reicht aber nach oben bis in die *robustus*-Zone (Kap. 10.2).

Nach KOZUR (1974b) stimmt die Conodontenfauna der tieferen Trochitenkalk-Formation mit den Faunen des Illyriums in der austroalpinen Provinz völlig und mit denen der westmediterranen und nordamerikanischen Provinz weitgehend überein. Ab der späten Folge m7b sind dann die Beziehungen zwischen Zentraleuropäischem Becken und westmediterraner Faunenprovinz stets enger als zur austroalpinen, süd-alpinen oder asiatischen. Bei den biostratigraphisch wichtigen Plattformconodonten (Kap. 4.3) entwickelte sich aus *Neogondolella mombergensis*, die von der tethyalen *N. constricta* abstammen könnte, völlig endemisch die Reihe bis zu *Celsigondolella watznaueri* (NARKIEWICZ & SZULC 2004). Generell ist im Oberen Muschelkalk der Artenreichtum im axialen Bereich des Südlichen Teilbeckens, besonders in Baden-Württemberg und Ostfrankreich, größer, was Zahl und Häufigkeit von exotischen Elementen angeht (BENECKE 1898, HOHENSTEIN 1906, HAGDORN 1985, URLICHS & MUNDLOS 1985, HAGDORN & SIMON 1993, URLICHS & KURZWEIL 1997, SCHWEIGERT & FUCHS 2012). Im südlichen Baden-Württemberg zeigen außerdem häufige Kieselknollen, die aus Kiesel-schwamm-Mumien (monaxone und hexactinellide Skleren) hervorgegangen sind, einen massiven Eintrag von Kieselsäure an, der in Folge m7 bereits in Mittelwürttemberg aussetzt (Kap. 9.14), in Folge m9 in einzelnen Horizonten bis Nord-Baden-Württemberg reicht. Es ist anzunehmen, dass Organismen mit Kieselskeletten die vorhandene Kieselsäure bereits in der Eingangsregion der Alemannischen Pforte aus dem Tethyswasser weitgehend gebunden haben und dass es weiter im Beckeninneren keine nennenswerten anderen Quellen gab (schriftl. Mitt. E. Nitsch 2016). In ähnlicher Weise ist die Verbreitung von Kiesel-schwämmen im pfortennahen Unteren Muschelkalk Oberschlesiens und des Heilkreuzgebirges zu verstehen (BODZIOCH 1997).

In Oberschlesien und der Altmark, wo die tonig-klas-tische Ausbildung (Boruschowitz- bzw. Warburg-Formation) bereits in der *spinusus*-Zone einsetzt (ASSMANN

1944, FRANZ et al. 2013), gibt es im Oberen Muschelkalk dagegen nur noch mehr oder weniger verarmte Muschelkalkfaunen. Neben dem Hauptverbindungsweg zur Tethys im Westen muss allerdings auch über die Ostkarpatenpforte noch ein direkter Zugang zur Tethys bestanden haben, was durch Crinoiden (*Encrinurus* sp.) in der Folge m7 des Heiligkreuzgebirges belegt ist (SENKOWICZOWA 1961, SZULC 2000, SALAMON 2005), während Crinoiden in Oberschlesien zu dieser Zeit fehlen und im Norddeutschen Becken in der glaukonitischen Fazies des Trochitenkalks (Krienberg-Subformation) stark zurücktreten (Kap. 9.1; 9.5; 9.6).

Ab dem Illyrium, z. T. erst ab dem frühen Ladinium war der westliche Tethys-Rand in den instabilen Schelf einbezogen und nahm nun eine vom Mitteleuropäischen Becken stark abweichende, differenzierte Entwicklung mit Karbonatplattformen und pelagischen Becken. Von diesem Zeitpunkt an, dem Bereich des Liegenden der Cycloidesbank, wurde die Muschelkalkfauna im gesamten Zentraleuropäischen Becken endemisch und Einwanderungen von Formen aus der Tethys setzen fast völlig aus. KOZUR (1974b) erklärt diese Veränderungen damit, dass das ionare Verhältnis dort zugunsten von CaSO_4 verschoben wurde und dass dabei das Euhalinikum des tieferen Oberen Muschelkalks durch ein „Pseudo-Euhalinikum“ ersetzt wurde, das von den ausgesprochen stenohalinen Formen wie Korallen, Crinoiden und Echiniden nicht toleriert wurde. Limitierend wirkte auch, dass das Wasser des Muschelkalkmeeres mit vermutlich 14 bis 35° C um ca. 4–6° wärmer war als das Wasser der Tethys, was sich aus Isotopen-Untersuchungen von Brachiopodenschalen durch KORTE et al. (1998, 2005) ergab. Anders zeigen sich die Befunde der weitgehend faziesunabhängigen Wirbeltiere (HAGDORN & RIEPPEL 1999). Darüber hinaus konnte ein Szenario für die Wanderungsbewegungen der Pachypleurosaurier (Sauropterygia) rekonstruiert werden, die im Anisium vom Zentraleuropäischen Becken in den westlichen Tethysraum eingedrungen sind, sich dort differenzierten und von dort im Ladinium (m9b und Unterkeuper) mit neuen Formen in den südlichen Teil des Germanischen Beckens zurückgekehrt sind (RENESTO et al. 2014).

Im Norddeutschen Hauptbecken zeigen die Dolomitsteine und Tonsteine der Warburg-Formation, die bei zyklischen Meeresspiegeltiefständen mit den Conchostraken und Ostrakoden führenden Tonsteinhorizonten 3 und 4 weit nach Südwesten ausgriffen, eine Verbrackung an, die offenbar von den Ceratiten bis zu einem gewissen Grad toleriert wurde. Im Südlichen Teilbecken und in der Eifeler Nord-Süd-Zone entstanden gleichzeitig flache Areale mit schwankender Salinität und folglich verarmten Faunen (Rottweil-Formation, Irrel-Formation). Über der Cycloidesbank fehlen stenohaline, benthische Exoten, wie sie bis zum

Ende der Folge m8 kurzfristige Zuwanderung durch die westliche Pforte belegen (ökostratigraphische Leithorizonte, HAGDORN & SIMON 1993), doch zeigen Einzelfunde von tethyalen Cephalopoden (*Michelinoceras* in der *nodosus*-Zone, URLICHS & SCHRÖDER 1980), *Germanoteuthis* (SCHWEIGERT & FUCHS 2012) und Crinoiden (*Encrinurus* sp., HAAG 1910) in der oberen Rottweil-Formation, dass der Einwanderungsweg bis zum Ende des Muschelkalks nicht verschlossen war. Im Allgemeinen spiegelt das Benthos in der Folge m9 die zu dieser Zeit besonders ausgeprägte Faziesdifferenzierung deutlich wider: In den Tonsteinabfolgen der Warburg-Formation Norddeutschlands zeigen Ostrakoden und Conchostraken, das häufige Vorkommen von *Myophoria pesansensis* und das Aussetzen der jüngsten Ceratiten (*C. semipartitus*, *C. meissnerianus*) verstärkte Verbrackung an. Muschelfaunen im karbonatischen m9 Südwestdeutschlands sind trotz z.T. beachtlicher Diversität mit euryhalinen Elementen wie *Costatoria goldfussi* oder *Modiolus salzstettensis* pointiert, während marine Faunen mit Ceratiten gegen Ende des Muschelkalks (*semipartitus*-Zone) auf den Südwesten (Ostfrankreich) und die Fränkisch-Hessische Senke (im Norden bis ins Meißnergebiet und Südniedersachsen) begrenzt bleiben. Von den Echinodermen setzen Crinoiden, Echinoiden und Holothurien auch in Südwestdeutschland ganz aus, während die weniger salinitätsempfindlichen Asteriden und Ophiuren bis in die basalen Discoceratitenschichten persistierten. Der Brachiopode *Coenothyris vulgaris* setzt hier erst zusammen mit den letzten Ceratiten über der Oberen Terebratelbank an der Basis des Ostrakodontons aus, mit dem Verbrackung und Klastika-Schüttungen bis ins nördliche Baden-Württemberg vorrückten.

Im Südlichen Teilbecken zeichnet sich ab Folge m8 eine Ausweitung der maximalen Absenkung mit toniger Ceratitenfazies und erhöhten Mächtigkeiten (v.a. in der *praenodosus*-Zone) bis zur Muschelkalk-Obergrenze von der Fränkischen Senke weiter gegen Südwesten ab („Lothringische Straße“ FRANK 1931), während in Württemberg und Baden lagunäre Dolomite (Rottweil-Formation) und mächtige Schillkalke (Quaderkalk-Formation, Künzelsau-Subformation der Meißner-Formation) abgesetzt wurden. Während die ökostratigraphischen Leithorizonte bis einschließlich zur Cycloidesbank westlich des Rheins nicht ausgebildet sind, lassen sich Hauptterebratelbank, Obere Terebratelbank und Ostrakodonton mit Glaukonitkalk bis ins nördliche Lothringen feststellen. Dabei wurde aber keineswegs das Gebiet des historischen und heutigen Burgund (Bourgogne) erreicht, denn westlich der Saône ist der Obere Muschelkalk vollständig dolomitisiert und geht weiter gegen Zentralmassiv und Morvan in klastische Randfazies über (Kap. 10.2). M. Durand (schriftl. Mitt. 2017) weist auch darauf hin,

dass die aus der Gegend von Epinal bekannten Placuncopsisriffe (HÖLDER 1961) dem westlichen Beckenrand vorgelagert sind, nicht dem östlichen, wie HAGDORN & SIMON (2000: Abb. 10) angeben. Weil die Kalkfazies auf das Gebiet östlich der Saône begrenzt bleibt, mit der offensten marinen Entwicklung südlich der Vogesen im Bereich von Villersexel, gibt es keinen Grund, einen marinen Einwanderungsweg weiter westlich in Burgund zu postulieren. 50 km weiter südlich ist der Obere Muschelkalk durchgängig dolomitisch und auf der Breite von Genf mit sulfatischen Einschaltungen durchsetzt, was eine Zufuhr von normalem Meerwasser ausschließt und damit auch eine Meeresstraße entlang einem präfigurierten, aber anachronistischen Rhone-Graben.

Das von HAGDORN (2011) nach Muschel- und Brachiopoden-Faunen aufgestellte hypothetische Einwanderungsszenario zwischen dem Ablagerungsraum des südfranzösischen Muschelkalks der Umgebung von Toulon (Var) und dem Zentraleuropäischen Becken wird von URLICHS (2016) aus biostratigraphischen Gründen abgelehnt. Auch nach M. Durand (schriftl. Mitt. 2016) spricht die Datenlage gegen dieses Szenario.

Dank

Annette E. Götz, Portsmouth University, Edgar Nitsch, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Freiburg i. Br., Heinz-Gerd Röhling, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover, und Joachim Szulc, Universität Krakau, danke ich für sorgfältige Begutachtung, wichtige Hinweise und konstruktive Kritik. Besonderer Dank gilt Marc Durand, Nancy, für wertvolle Hinweise auf Entwicklung und Reichweiten der marinen Muschelkalkfazies gegen den westlichen Beckenrand.

Schriftenverzeichnis

- ALEXANDROWICZ, S. & SIEDLECKI, S. (1960): Bunter deposits in the vicinity of Rybnik, Upper Silesia. – *Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego*, 30: 167-199 [polnisch, mit engl. Zusammenfassung].
- ASSMANN, P. (1937): Revision der Fauna der Wirbellosen der oberschlesischen Trias. – *Abhandlungen der preussischen geologischen Landes-Anstalt*, N.F. 170: 1-134; Berlin.
- ASSMANN, P. (1944): Die Stratigraphie der oberschlesischen Trias. Teil 2: Der Muschelkalk. – *Abhandlungen des Reichsamts für Bodenforschung*, N.F. 208: 1-50; Berlin.
- BACHMANN, G. H., GELUK, M.C., WARRINGTON, G., BECKER-ROMAN, A., BEUTLER, G., HAGDORN, H., HOUNSLOW, M. W., NITSCH, E., RÖHLING, H.-G., SIMON, T. & SZULC, A. (2010): Triassic. – In: DOORNENBAL, J.C. & STEVENSON, A.G. (Hrsg.): *Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area*: 175-193; EAGE Publications b.v. (Houten).
- BECKER, A. (2005): Sequenzstratigraphie und Fazies des Unteren und Mittleren Buntsandsteins im östlichen Teil des Germanischen Beckens (Deutschland, Polen). – *Halle'sches Jahrbuch für Geowissenschaften B*, Beihefte 21: 1-117; Halle (Saale).
- BENECKE, E. W. (1898): Diplopoda und einige andere Versteinerungen im elsass-lothringischen Muschelkalk. – *Mitteilungen der geologischen Landesanstalt von Elsass-Lothringen*, 4: 277-285; Straßburg.
- BEUTLER, G. & SZULC, J. (1999): Die paläogeographische Entwicklung des Germanischen Beckens in der Trias und die Verbindung zur Tethys. – In: HAUSCHKE, N. & WILDE, V. (Hrsg.), *Trias, eine ganz andere Welt: Mitteleuropa im frühen Erdmittelalter*: 71-80; München (Pfeil).
- BODZIOCH, A. (1997): Sponge/crinoidal/coral bioherms from the Muschelkalk of Upper Silesia (Middle Triassic, Poland). – *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sección Geología)*, 92 (1/4): 49-59; Madrid.
- BRACK, P., RIEBER, H. & URLICHS, M. (1999): Pelagic Successions in the Southern Alps and their correlation with the Germanic Middle Triassic. – *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, Teil I, 1998 (7-8): 813-852; Stuttgart.
- BRANDNER, R. W. (1984): Meeresspiegelschwankungen und Tektonik in der Trias der NW-Tethys. – *Jahrbuch der geologischen Bundesanstalt*, 116 (4): 435-475; Wien.
- BRAUN, J. (1983): Mikropaläontologische und sedimentologische Untersuchungen an einem Profil im Unteren Muschelkalk in der Wutachschlucht (SE-Schwarzwald). – *Diplomarbeit Univ. Tübingen*, 43 S. [unveröffentlicht].
- BRINKMANN, R. (1926): Tektonik und Sedimentation im deutschen Triasbecken. – *Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft*, 78: 52-749; Berlin.
- BROCARD, CH. F. (1991): La plate-forme Provençale au Trias Moyen. Un modèle de rampe carbonatée en milieu restreint. Dynamique des paléoenvironnements – évolution diagénétique. – 282 S.; These Univ. de Provence Marseille.
- BUDUROV, K., CALVET, F., GOY, A., MARQUEZ-ALIAGA, A., MARQUEZ, L., TRIFONOVA, E. & ARCHE, A. (1993): Middle Triassic Stratigraphy and Correlation in Parts of the Tethys Realm (Bulgaria and Spain). – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.), *Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991 (Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg)*, 2: 157-164; Stuttgart, Korb (Goldschneck).
- COUREL, L., DURAND, M., MAGET, P., MAIAUX, C., MENILLET, F., PAREYN, C. et al. (1980): Trias – In: MÉGNIEN, C. (Ed.), *Synthèse géologique du Bassin de Paris. Mémoire BRGM*, 101: 37-74.
- DEECKE, W. (1922): Der paläogeographische Charakter des germanischen Muschelkalk-Binnenmeeres. – *Verhandlungen der naturforschenden Gesellschaft Basel*, 33: 22 S.; Basel.
- DERCOURT, J., GAETANI, M., VRIELYNCK, B., BARRIER, E., BIJUDUVAL, BRUNET, M.-F., CADET, J. P., CRASQUIN, S. & SANDULESCU, M. (2000): *Atlas Peri-Tethys. Paleogeographical Maps*. – Commission for the Geological Map of the World: 269 pp.; Paris.
- DIENER, C. (1915): Die marinen Reiche der Triasperiode. – *Denkschriften der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien, Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse*, 92: 405-540; Wien.

- EINSELE G. & SCHÖNENBERG, R. (1964): Epirogen-tektonische Grundzüge des süddeutschen Beckens und seiner südöstlichen Randgebiete im Mesozoikum. – Publication Service Géologique du Luxembourg, 14: 139-164.
- EVANS, D. J., GRAHAM, C., ARMOUR, A., BATHURST, P. (2003): The Millennium Atlas: Petroleum Geology of the Central and Northern North Sea. – 390 S.; London (The Geological Society).
- FEIST-BURKHARDT, S., GÖTZ, A. E., SZULC, J., BORKHATARIA, R., GELUK, M., HAAS, J., HORNUNG, J., JORDAN, P., KEMPE, O., MICHALIK, J., NAWROCKI, J., REINHARDT, L., RICKEN, W., RÖHLING, H., RÜFFER, T., TÖRÖK, A. & ZÜHLKE, R. (2008a): Triassic. – In: McCANN, T. (Hrsg.): The Geology of Central Europe: 749-821; London (The Geological Society of London).
- FEIST-BURKHARDT, S., GÖTZ, A. E., RUCKWIED, K. & RUSSELL, J. D. (2008b): Palynofacies patterns, acritarch diversity and stable isotope signatures in the Lower Muschelkalk (Middle Triassic) of N Switzerland: Evidence of third-order cyclicity. – Swiss Journal of Geosciences, 101: 1-15; Basel.
- FOSTER, W. J., DANISE, S., PRICE, G. D., TWITCHETT, R. J. (2017): Subsequent biotic crises delayed marine recovery following the late Permian mass extinction event in northern Italy. – PloS ONE, 12(3): e0172321. Doi:10.1371/journal.pone.0172321.
- FRAAS, E. (1899): Die Bildung der germanischen Trias, eine petrogenetische Studie. – Jahreshefte des Vereins für vaterländische Naturkunde in Württemberg, 55: 36-100; Stuttgart.
- FRANK, M. (1931): Marine Straßen und Faunenwanderwege in Süddeutschland zur Triaszeit. – Geologische Rundschau, 22 (1): 1-11.
- FRANZ, M., KAISER, S. I., FISCHER, J., HEUNISCH, C., KUSTATSCHER, E., LUPPOLD, F. W., BERNER, U. & RÖHLING, H.-G. (2015): Eustatic and climatic control on the Upper Muschelkalk sea (Late Anisian/Ladinian) in the Central European Basin. – Global and Planetary Change, 135: 1-27; Amsterdam.
- FRECH, F., Hrsg. (1903-1908): Lethaea geognostica. Handbuch der Erdgeschichte mit Abbildungen der für die Formationen bezeichnendsten Versteinerungen. II Theil Das Mesozoikum. 1. Heft Trias. – 623 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- GAERTNER, H. & RÖHLING, H.-G. (1993): Zur lithostratigraphischen Gliederung und Paläogeographie des Mittleren Muschelkalks im Nordwestdeutschen Becken. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991 – Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, 2: 85-103; Stuttgart, Korb (Goldschneck).
- GELUK, M. C. (2005): Stratigraphy and tectonics of Permo-Triassic basins in the Netherlands and surrounding areas. – 171 S.; (Selbstverlag).
- GISLER, C., HOCHULL, P. A., RAMSEYER, K., BLÄSI, H. & SCHLUNEGGER, F. (2007): Sedimentological and palynological constraints on the basal Triassic sequence in Central Switzerland. – Swiss Journal of Geosciences, 100: 263-272; Basel.
- GLENNIE, K. W., HIGHAM, J. & STEMMERIK, L. (2003): Permian. – In: EVANS, D. J., GRAHAM, C., ARMOUR, A., BATHURST, P. (Hrsg.): The Millennium Atlas: Petroleum Geology of the Central and Northern North Sea: 91-103; London (The Geological Society).
- GÖTZ, A. E. & FEIST-BURKHARDT, S. (2012): Phytoplankton associations of the Anisian Peri-Tethys Basin (Central Europe): Evidence of basin evolution and palaeoenvironmental change. – Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 337-338: 151-158.
- GÖTZ, A. E. & GAST, S. (2010): Basin evolution of the Anisian Peri-Tethys: implications from conodont assemblages of Lower Muschelkalk key sections (Central Europe). – Zeitschrift der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 161 (1): 39-49; Stuttgart
- HAAG, F. (1902): *Encrinurus*-Krone aus dem Dolomit des Oberen Muschelkalks bei Zimmern ob Rottweil. – Jahreshefte des Vereins für vaterländische Naturkunde in Württemberg, 58: LIX; Stuttgart.
- HAGDORN, H. (1983): *Holocrinus doreckae* n. sp. aus dem Oberen Muschelkalk und die Entwicklung von Sollbruchstellen der Isocrinida. – Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Monatshefte 1983 (6): 345-368; Stuttgart.
- HAGDORN, H. (1985): Immigration of crinoids into the German Muschelkalk basin. – Lecture Notes in Earth Sciences, 1: 237-254; Berlin, Heidelberg, New York (Springer).
- HAGDORN, H. (2011): Invertebrate fauna, biostratigraphy, and paleobiogeography of the marine Trias Carbonaté of SE-France, compared to the Upper Muschelkalk of Central Europe. – In: DURAND, M., CARON, J.-P. & HAGDORN, H., with contributions of J. B. DIEZ-FERRER, Pan-European Correlation of the Triassic. 8th International Field Workshop. Triassic of Southeast France (Provence, Var & Alpes Maritimes), 13-36; www.stratigraphie.de/perm-trias/Triassic_Workshop_2011_Guide.pdf
- HAGDORN, H., GLUCHOWSKI, E. & BOCZAROWSKI, A. (1996): The crinoid Fauna of the Diplopora-Dolomite (Middle Muschelkalk, Triassic, Upper Anisian) at Piekary Slaskie in Upper Silesia. – Geologisch-paläontologische Mitteilungen Innsbruck, 21: 47-87; Innsbruck.
- HAGDORN, H., KONRAD, G. & TÖRÖK, A. (1998): Crinoids from the Muschelkalk of the Mecsek Mountains and their stratigraphical significance. – Acta Geologica Hungarica, 40 (4): 391-410; Budapest.
- HAGDORN, H. & RIEPEL, O. (1999): Stratigraphy of marine reptiles in the Triassic of Central Europe. – Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I 1998 (7-8): 651-678; Stuttgart.
- HAGDORN, H. & SIMON, T. (1993): Ökostratigraphische Leitbänke im Oberen Muschelkalk. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991 – Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, 2: 193-208; Korb, Stuttgart (Goldschneck).
- HAGDORN, H. & SIMON, T. (2000): *Placunopsis*-Riffe im Oberen Muschelkalk der Süd-Eifel. – Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I 1999 (3/4): 293-314; Stuttgart.
- HAGDORN, H., SZULC, J., BODZIOCH, A. & MORYCOWA, E. (1999): Riffe aus dem Muschelkalk. – In: HAUSCHKE, N. & WILDE, V. (Hrsg.): Trias, eine ganz andere Welt: Mitteleuropa im frühen Erdmittelalter, 309-320; München (Pfeil).
- HEUNISCH, C. & RÖHLING, H. (2016): Early Triassic phytoplankton episodes in the Lower and Middle Buntsandstein of the Central European Basin. – Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften – German Journal of Geology, 167 (2/3): 227-248; Stuttgart.
- HÖLDER, H. (1961): Das Gefüge eines *Placunopsis*-Riffs aus dem Hauptmuschelkalk. – Jahresberichte und Mitteilungen

- gen des oberrheinischen geologischen Vereins, N. F. 43: 41-48; Stuttgart.
- HOHENSTEIN, V. (1913): Beiträge zur Kenntnis des Mittleren Muschelkalks und des unteren Trochitenkalks am östlichen Schwarzwaldrand. – Geologisch-paläontologische Abhandlungen, N. F. 12: 173-272; Jena.
- KORTE, C., KOZUR, H. & VEIZER, J. (1998): $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, d^{18}O and $\delta^{13}\text{C}$ of the Muschelkalk: Comparison to Tethys. – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, B Beihefte 5: 93-94; Halle/Saale.
- KORTE, C., KOZUR, H. & VEIZER, J. (2005): $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of Triassic brachiopods and carbonate rocks as proxies for coeval seawater and palaeotemperature. – Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 226: 287-306.
- KOVÁCS, S. (1992): Tethys “western end” during Late Paleozoic and Triassic and their possible genetic relationship. – Acta Geologica Hungarica, 35 (4): 329-369; Budapest.
- KOZUR, H. (1974a): Biostratigraphie der germanischen Mitteltrias. – Freiburger Forschungshefte, C 280, Teil 1: 56 S., Teil 2: 71 S., Teil 3: 15 Anlagen; Leipzig.
- KOZUR, H. (1974b): Probleme der Triasgliederung und Parallelisierung der germanischen und tethyalen Trias. Teil I: Abgrenzung und Gliederung der Trias. – Freiburger Forschungshefte, C 298: 139-197; Leipzig.
- KOZUR, H. (1975): Probleme der Triasgliederung und Parallelisierung der germanischen und tethyalen Trias. Teil II: Anschluss der germanischen Trias an die internationale Triasgliederung. – Freiburger Forschungshefte, C 304: 51-77; Leipzig.
- KOZUR, H. & BACHMANN, G. H. (2005): Correlation of the Germanic Triassic with the international scale. – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, B 25: 49-79; Halle/Saale.
- KOZUR, H. & BACHMANN, G. H. (2008): Updated correlation of the Germanic Triassic with the Tethyan scale and assigned numeric ages. – Berichte der Geologischen Bundesanstalt, 76, 53-58; Wien.
- LEPPER, J., RAMBOW, D. & RÖHLING, H.-G. (2013): Lithostratigraphie des Buntsandstein in Deutschland. – In: DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (Hrsg.; Koordination und Redaktion: J. LEPPER & H.-G. RÖHLING für die Subkommission Perm-Trias): Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein (Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Heft 69): 49-149; Hannover.
- McKIE, T. (2014): Climatic and tectonic controls on Triassic dryland terminal fluvial system architecture, central North Sea. – In: MARTINIUS, A.W., RAVNAS, R., HOWELL, J. A., STEEL, R.J. & WONHAM, P. (Hrsg.): Depositional Systems to Sedimentary Successions in the Norwegian Continental Margins. – International Association of Sedimentologists, Special Publications, 46: 19-57; 22 figs.; London (John Wiley).
- MENNING, M., GAST, R., HAGDORN, H., KÄDING, K.-C., SIMON, T., SZURLIES, M. & NITSCH, E. (2005): Zeitskala für Perm und Trias in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002, zyklustratigraphische Kalibrierung der höheren Dyas und Germanischen Trias und das Alter der Stufen Radium bis Rhaetium 2005. – Newsletters on Stratigraphy, 41 (1/3): 173-210; Stuttgart.
- MILEWSKA, Z. & MORYC, W. (1981): Mikrofauna triasu Przedgórze Karpat. – Materiały V Krajowej Konferencji Paleontologów Kielce-Sosnowiec 1981: 15-24.
- MORYC, W. (1971): Triassic of the Middle Carpathians Foreland. – Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego, 41: 419-486 [polnisch, mit engl. Zusammenfassung].
- MORYCOWA, E. (1988): Middle Triassic Scleractinia from the Cracow-Silesia Region, Poland. – Acta Palaeontologica Polonica, 33 (2): 91-121; Warszawa.
- MOSTLER, H. (1993): Das Germanische Muschelkalkbecken und seine Beziehungen zum tethyalen Muschelkalkmeer. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991 – Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, 2: 11-14; Stuttgart, Korb (Goldschnecke).
- NARKIEWICZ, K. & SZULC, J. (2004): Controls on migration of conodont fauna in peripheral oceanic areas. An example from the Middle Triassic of the Northern Peri-Tethys. – Geobios, 37: 425-436; Lyon.
- PAUL, J., WEMMER, K. & AHRENDT, H. (2008): Provenance of siliciclastic sediments (Permian to Jurassic) in the Central European Basin. – Zeitschrift der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 159 (4): 641-650; Stuttgart.
- PERYT, T. M., GELUK, M. C., MATHIESEN, A., PAUL, J. & SMITH, K. (2010): Zechstein. – In: DOORNENBAL, J.C. & STEVENSON, A.G. (Hrsg.): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area: 123-147; EAGE Publications b.v. (Houten).
- PICARD, E. (1915): Mitteilungen über den Muschelkalk bei Rüdersdorf. – Jahrbuch der preußischen geologischen Landes-Anstalt, 35 (2): 366-372; Berlin.
- PIENKOWSKI, G. (1989): Sedimentological criteria for delimitating Zechstein/Buntsandstein and Permian/Triassic boundaries in Poland. – Przegląd Geologiczny, 37: 237-247.
- RAAB, O. (1907): Neue Beobachtungen aus dem Rüdersdorfer Muschelkalk und Diluvium. – Jahrbuch der königlich preußischen geologischen Landesanstalt, 25: 205-217; Berlin.
- REIN, S. & WERNEBURG, R. (2010): *Parapinacoceras* und *Gymnites* (Ammonoidea) aus der *enodis/posseckeri*-Zone im Oberen Muschelkalk (Mittel-Trias, Ladin) Thüringens. – Semana, 25: 87-100; Schleusingen.
- RENESTO, S. C., BINELLI, G. P. M. & HAGDORN, H. (2014): A new pachypleurosaur from the Middle Triassic Besano Formation of Northern Italy. – Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen 271 (2): 151-168; Stuttgart.
- RICOUR, J. (1962): Contributions à une Révision du Trias Français. – Mémoires pour Servir à l'Explication de la Carte Géologique Détaillée de la France, 471 S.; Paris (Imprimerie Nationale).
- RIEPEL, O. (2000): Middle Triassic marine vertebrates from the northern Gondwanan shelf. – Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil 1 1998 (9/10): 1269-1284; Stuttgart.
- RIEPEL, O. & HAGDORN, H. (1997): Paleobiogeography of Middle Triassic Sauropterygia in Central and Western Europe. – In: CALLAWAY, J. M. & NICHOLLS, E. L. (Hrsg.): Ancient Marine Reptiles, 121-144; San Diego (Academic Press).
- RÖHLING, H.-G. (2013): Der Buntsandstein im Norddeutschen Becken – regionale Besonderheiten. – In: DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (Hrsg.; Koordination und

- Redaktion: J. LEPPER & H.-G. RÖHLING für die Subkommission Perm-Trias: Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein (Schriftenreihe Der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 69): 269-384; Hannover.
- RÖHLING, H.-G. & LEPPER, J. (2013): Paläogeographie des Mitteleuropäischen Beckens während der tieferen Trias (Buntsandstein). – In: DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (Hrsg.; Koordination und Redaktion J. LEPPER und H.-G. RÖHLING für die Subkommission Perm-Trias): Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein (Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 69): 43-67; Hannover.
- SALAMON, M. (2005): Holocrinid columnals from the Upper Muschelkalk of the Holy Cross Mts. (eastern part of the Germanic Basin). – *Geological Quarterly*, 49 (1): 105-107; Warszawa.
- SCHWEIGERT, G. & FUCHS, D. (2012): First record of a true coleoid cephalopod from the Germanic Triassic (Ladinian). – *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen* 266 (1): 19-30; Stuttgart.
- SENKOWICZOWA, H. (1961): The Roeth and Muschelkalk in the western marginal area of the Swiety Krzyz Mountains. – *Biuletyn Panstwowego Instytutu Geologicznego*, 167: 41-99; Warszawa.
- SENOWBARI-DARYAN, B., ZÜHLKE, R., BECHSTÄDT, T. & FLÜGEL, E. (1993): Anisian (Middle Triassic) Buildups of the Northern Dolomites (Italy): The Recovery of Reef Communities after the Permian/Triassic Crisis. – *Facies*, 28: 181-256; Erlangen.
- SIMON, T. & BARTENBACH, M., BOCK, H., LEPPER, J., MARTIN, M. & REIMANN, M. (2009): Ergebnisse der Forschungsbohrung Wutachschlucht (Kreis Breisgau-Hochschwarzwald, Baden-Württemberg). – *LGRB-Informationen*, 22: 103-122; Freiburg i. Br.
- SINGER, V. (2014): Über eine zyklische Gips-Fazies der Muschelbrekzie (Röt-Formation) bei Bürgel. – *Beiträge zur Geologie von Thüringen, N.F.* 21: 39-51; Jena.
- SZULC, J. (1999): Anisian-Carnian evolution of the Germanic basin and its eustatic, tectonic and climatic controls. – *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I*, 1998 (7-8): 813-852; Stuttgart.
- SZULC, J. (2000): Middle Triassic evolution of the northern Peri-Tethys area as influenced by early opening of the Tethys Ocean. – *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 70: 1-48; Kraków.
- SZULC, J. (2007a): Structural setting of the Germanic Triassic and problems with its stratigraphical setup. – In: SZULC, J. & BECKER, A. (Hrsg.): *International workshop on the Triassic of Southern Poland*. September 3–8, 2007. *Fieldtrip Guide*: 5-6; Kraków.
- SZULC, J. (2007b): Sponge-microbial stromatolites and coral-sponge recovery on the Triassic of the Western Tethys domain. – *New Mexico Museum of Natural History & Science, Bulletin* 41: 402, Albuquerque.
- TIETZE, K.-E. & RÖHLING, H.-G. (2013): Sequenz-, Base-level- und Zyklustratigraphie im Buntsandstein – Ein Statusbericht. – In: DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (Hrsg.; Koordination und Redaktion: J. LEPPER & H.-G. RÖHLING für die Subkommission Perm-Trias): *Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein* (Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 69): 233-268; Hannover.
- TORNQUIST, A. (1912): Die Binnenmeerfazies der Trias. – *Geologische Rundschau*, 3 (2): 111-129; Leipzig.
- TRAMMER, J. (1972): Stratigraphy and facies development of the Muschelkalk in the south-western Holy Cross Mts. – *Acta Geologica Polonica*, 25 (3): 179-216; Warszawa.
- URLICHS, M. (1982): Zur Stratigraphie und Fossilführung des Lettenkeupers (Ob. Trias) bei Schwäbisch Hall (Baden-Württemberg). – *Jahresberichte und Mitteilungen des oberrheinischen geologischen Vereins, N. F.* 64: 213-224; Stuttgart.
- URLICHS, M. (2016): Phyletic relationships among *Alloceratites* species from the upper Erfurt Formation of Thuringia (Late Ladinian, Germany) and from the Early Ladinian of Recoaro (Italy) and Toulon (France). – *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen* 282 (1): 27-35; Stuttgart.
- URLICHS, M. & KURZWEIL, W. (1997): Erstnachweis von *Fleoxptychites* (Ammonoidea) aus dem Oberen Muschelkalk (Mitteltrias) Nordwürttembergs. – *Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, B* 253: 1-8; Stuttgart.
- URLICHS, M. & MUNDLOS, R. (1985): Immigration of cephalopods into the Germanic Muschelkalk basin and its influence on their suture line. – *Lecture Notes in Earth Sciences*, 1: 221-236; Berlin, Heidelberg, New York (Springer).
- URLICHS, M. & SCHRÖDER, W. (1980): Erstfund eines Orthoceratiten (*Michelinoceras campanile*) im germanischen Muschelkalk – *Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, B* 59: 1-7; Stuttgart.
- ZIEGLER, P. A. (1988): Evolution of the Arctic – North Atlantic and the Western Tethys. – *American Association of Petroleum Geologists, Memoir* 43: 198 S.
- ZIEGLER, P. A. (1990): *Geological Atlas of Western and Central Europe*. – Second and completely revised edition, 239 pp.; Bath (Geological Society Publishing House).
- ZÜHLKE, R. (2000): Fazies, hochauflösende Sequenzstratigraphie und Beckenentwicklung im Anis (Mittlere Trias) der Dolomiten (Südalpin, Italien). – *Gaea Heidelbergensis*, 6: 368 S.; Heidelberg.
- Manuskript eingegangen: 08.02.2017
Annahme zur Veröffentlichung: 07.07.2017
- Nach Redaktionsschluss erschienen folgende Arbeiten zur Paläobiogeographie, in denen andere Migrationsszenarien zur Einwanderung der Ceratiten des Oberen Muschelkalks rekonstruiert werden als im vorliegenden Kapitel:
- BRANDT, S. & REIN, S. (2019): Die Chronospezies *Ceratites flexuosus* von Geilsdorf – Ein evolutionsbiologischer Modellfall der evolutionären Art *Ceratites nodosus*. – *Vernate*, 38: 53-76; Erfurt.
- REIN, S. (2019): *Sturia brandti* und *Sephardonutilus nov. gen.* – Immigranten, Migrationswege und Korrelationen im Oberen Muschelkalk (Mittlere Trias). – *Vernate*, 38: 77-94; Erfurt.
- 2019 erschienen ist auch die Arbeit, in der Szulc für die Einwanderung mariner Faunen (Kleingastropoden, Mikroconchen, Schwämme) in der basalen Trias (Griesbachium) aus dem borealen Bereich durch die Grabensysteme der Nordsee plädiert:
- SZULC, J. (2019): Lower Triassic marine Buntsandstein deposits in the Central European Basin. – *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 170: 311-320; Stuttgart.

HAGDORN, H. (2020): Geschichtliche Entwicklung der Muschelkalk-Stratigraphie. – In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Koordination und Redaktion: HAGDORN, H., SIMON, T., für die Subkommission Perm-Trias): Stratigraphie von Deutschland XIII. Muschelkalk. – Schriftenr. Dt. Ges. Geowiss., 91: S. 124-143, 10 Abb., 1 Tab.; Berlin.

2.1

Geschichtliche Entwicklung der Muschelkalk-Stratigraphie

[Historical development of the Muschelkalk stratigraphy]

Hans Hagdorn

Muschelkalkmuseum, Schloss-Str. 11, 74653 Ingelfingen, e-mail: encrinus@hagdorn-ingelfingen.de

Kurzfassung

Beschrieben wird der wissenschaftsgeschichtliche Erkenntnisgang von der ersten Benennung des Muschelkalks bis zur Gegenwart. Der Begriff wurde 1761 von dem Rudolstädter Arzt und Aufklärer Georg Christian Füchsel als Bezeichnung für das „obere Kalkgebirge“ in der Abfolge des thüringischen „Flözgebirges“ geprägt und anhand von Fossilien charakterisiert. Bis zum Ende der 1820er Jahre war die Schichtenfolge des Deckgebirges durchgängig bekannt und nach einer Zeit irrtümlicher Korrelation von Mitteldeutschland über Südwestdeutschland bis ins benachbarte Frankreich richtig korreliert. 1834 stellte Friedrich von Alberti den Muschelkalk als mittlere, marine Einheit in seine Trias-Formation. Die lithostratigraphische Untergliederung des Muschelkalks wurde nun zunehmend in Regionalbearbeitungen verfeinert, wobei in Süddeutschland eine hochauflösende Bankstratigraphie etabliert wurde. Mit Adolf Riedel begann 1916 die biostratigraphische Zonierung nach Ceratiten, ab den 1960er Jahren mit Heinz Kozur nach Conodonten und anderen Mikrofossilien. Mit der Arbeit der Subkommission Perm-Trias wird der Muschelkalk terminologisch und methodisch eindeutig gegliedert nach Biostratigraphie (Zonen), Lithostratigraphie (Formationen) und Allostratigraphie (Folgen). Seit dem ausgehenden 19. Jh. wurden für den Muschelkalk Fazies- und Genesemodelle erstellt, die in den letzten Jahrzehnten, durch sedimentologische Untersuchungen untermauert, in einen zyklustratigraphischen und sequenzstratigraphischen Kontext gestellt wurden.

Abstract

In this chapter the historical development of the Muschelkalk stratigraphy is described from its earliest mention up to the present day. The term Muschelkalk was coined in 1761 by the Rudolstadt physician and proponent of enlightenment, Georg Christian Füchsel, for designing the „oberes Kalkgebirge“ [upper limestone unit] within the column of the Thuringian

„Flözgebirge“ [sedimentary rocks] by means of fossils. Until the end of the 1820s the sequence of the stratigraphic column had been explored and was consolidated after a period of erroneous correlations of the central German units with corresponding units in South Germany and East France. In 1834 Friedrich von Alberti defined the Muschelkalk as the marine middle unit of his “Trias-Formation”. The lithostratigraphic subdivision of the Muschelkalk was step by step refined in regional research studies by a high resolution marker bed stratigraphy established in South Germany. Adolf Riedel began to develop a biostratigraphic zonation by means of ceratites in 1916, from the 1960s onward, Heinz Kozur established zonations using conodonts and other microfossils. The work of the German Permian and Triassic Subcommission resulted in methodologically and terminologically unequivocal subdivisions of biostratigraphic zones, lithostratigraphic formations, and allostratigraphic “Folgen”. Since the late 19th century, genetical models of the Muschelkalk were generated from the facies distribution. During the last decades they were interpreted in the context of cyclostratigraphy and sequence stratigraphy.

Schlüsselwörter: Wissenschaftsgeschichte, Stratigraphie, Muschelkalk

Keywords: History of science, stratigraphy, Muschelkalk

1. Einführung

Der Begriff *Muschelkalk* im Sinn einer bestimmten, von anderen Gesteinen unterscheidbaren Formation, also einer stratigraphischen Einheit, wurde im Jahr 1761, vor nunmehr über 250 Jahren, geprägt und gehört damit zu den ältesten stratigraphischen Begriffen überhaupt. Die Erforschungsgeschichte des Muschelkalks und seiner Stellung innerhalb der Schichtenfolge, seine Identifizierung, Korrelierung und Abgrenzung, die nicht ohne Irrtümer verlief, führt in die Pionierzeit der Erforschung des Deckgebirges

in Mitteleuropa. Diese begann mit Johann Gottlob Lehmanns (1719–1767) *Versuch einer Geschichte von Flötzgebirgen* (LEHMANN 1756) und war im Wesentlichen mit Friedrich von Albertis Epochenwerk von 1834 abgeschlossen, in dem er das System der Trias begründete und benannte (v. ALBERTI 1834).

Darstellungen der Wissenschaftsgeschichte finden sich bei KEFERSTEIN (1840), dann bei v. ZITTEL (1899) und, was die Germanische Trias anbelangt am detailliertesten, bei BENECKE (1877). Einzelheiten zur Gliederung des Unteren Muschelkalks sind bei VOIGT (1961) nachzulesen. Zusammenfassende neuere Darstellungen zur Germanischen Trias geben NITSCH (1996) sowie HAGDORN & NITSCH (1999) und NITSCH & HAGDORN (2015), zur Entwicklung des chronologischen Stufenschemas LUCAS (2010). Biographische und bibliographische Angaben findet man bei LAMBRECHT & QUENSTEDT (1938).

2. Identifizierung und Abgrenzung des Muschelkalks und seine Stellung in der Schichtenfolge

Ausgehend vom Harz hatte LEHMANN (1756) als preußischer Bergbeamter die Schichtenfolge vom Grundgebirge bis zum Zechstein genau und zutreffend beschrieben und gegliedert, die jüngeren Gesteine jedoch in einer Abteilung zusammengefasst, darunter die Ammoniten führenden Kalke von Schöningen am Elm, also offensichtlich Muschelkalk. Er erkannte, dass dieselben Schichten überall in seinem Untersuchungsgebiet, dem Mansfelder Kupferschiefer-Revier, in derselben Abfolge über dem „Ganggebürge“ wiederkehren, und hat damit die mitteleuropäische Stratigraphie begründet (v. FREYBERG 1955). Es war dann aber der Rudolstädter fürstliche Leibarzt Georg Christian Füchsel (1722–1773), der erstmals im Jahr

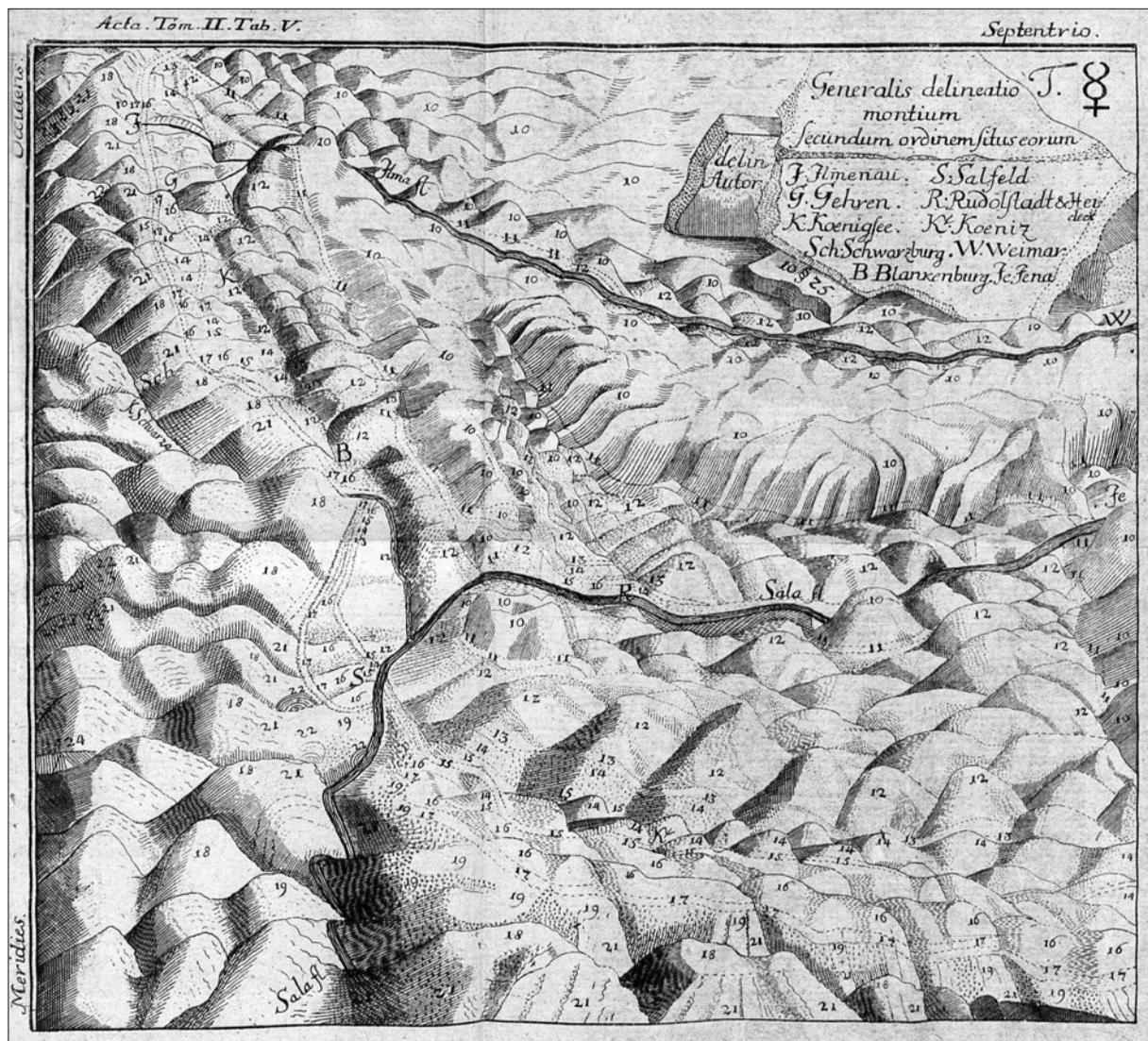


Abb. 1: „Allgemeine Abbildung der Gebirge nach ihrer Lage“ aus FÜCHEL (1761). Noch waren die Gesteine an der Erdoberfläche mit Zahlen wiedergegeben. So bedeuten: 10 Muschelkalk, 11 Röt (z. T. auch Keuper), 12 und 13 Buntsandstein, 14 und 15 oberer und mittlerer Zechstein, 16 und 17 unterer Zechstein, 18 Grauliegendes, 19 gerötetes Altpaläozoikum, 21 bis 25 Grundgebirge (Foto: Thüringer Universitäts- und Landesbibliothek Jena).