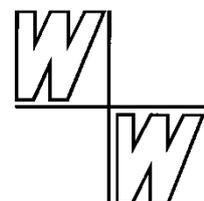


**SEDIMENTFOLGEN UND  
IHRE INTERPRETATION:  
ZYKLOSTRATIGRAPHIE UND DAS  
MILANKOVITCH-ZYKLEN-SYNDROM**

Michael Kotulla



Mai 2015



**Titelbild** (und Ausschnitt Seite 1):

Paläozäne Sedimentfolge in Zumaia, Nordspanien (siehe Abschnitt 5.11); Foto: © alfernec – fotolia.com.

W+W Special Paper G-15-1

Herausgegeben von der Studiengemeinschaft Wort und Wissen e. V.

Verfügbar online als PDF unter: <http://www.wort-und-wissen.de/artikel.html>

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Fragestellung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>2</b>
2.1	Sedimentfolgen und Zyklen .....	2
2.2	Zyklostratigraphie .....	3
2.3	Milankovitch-Theorie.....	3
2.4	Astronomische Parameter der Erde .....	5
2.5	Astrochronologie und Astronomische Zeitskala .....	5
<b>3</b>	<b>Kurzer historischer Abriss</b> .....	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Zyklostratigraphische Methodik</b> .....	<b>7</b>
4.1	Vorgehensweise.....	7
4.2	Sammlung von Daten.....	7
4.3	Zeitreihenanalyse.....	8
4.4	Tuning .....	9
4.5	Tuning-Fallbeispiel I: Konstruktion einer $\delta^{18}\text{O}$ -basierten Referenz-Zeitskala für das Oberpleistozän (SPECMAP).....	10
4.6	Tuning-Fallbeispiel II: Konstruktion einer $\delta^{18}\text{O}$ -basierten Referenz-Zeitskala für das Plio-Pleistozän (LR04) .....	16
<b>5</b>	<b>Beschreibung, Analyse und Diskussion ausgewählter zyκλοstratigraphischer Arbeiten</b> .....	<b>19</b>
5.1	GILBERTS Versuch einer sedimentären Messung geologischer Zeit.....	19
5.2	Die Green-River-Formation: Versuch einer unabhängigen Verifizierung radiometrischer Altersbestimmung.....	22
5.3	Die „Pacemaker“-Studie: Bestätigung der „Astronomischen Theorie der Eiszeiten“?.....	26
5.4	Mitteldevonische Sedimentfolge im Rheinischen Schiefergebirge: Versuch einer Korrelation mit theoretischen Milankovitch-Zyklen.....	40
5.5	Das Rossello-Komposit-Profil in Sizilien: Konstruktion einer astronomischen Zeitskala für das Pliozän.....	44
5.6	Datierung des Wostok-Eiskerns: Imprägnation mit Milankovitch-Periodizitäten.....	54
5.7	Untersuchung unterkretazischer Sedimentfolgen in Norddeutschland im Rahmen eines ausgewiesenen Zyklen-Projektes .....	60

5.8	Messeler Ölschiefer: Zyklische Sedimentation im Meter-Bereich? .....	64
5.9	Zyklostratigraphische Fein-Kalibrierung des Buntsandstein .....	68
5.10	Zyklostratigraphische Interpretation einer kurzen kretazischen Sedimentfolge in Griechenland.....	71
5.11	Versuch einer astronomischen Kalibrierung des Paläozäns mit dem theoretischen kurzen Exzentrizitätszyklus an erbohrten Kalkschlämmen der Tiefsee.....	75
5.12	Zyklische Sedimentation in den neogenen Braunkohlevorkommen des Ptolemäis-Beckens (Griechenland)? .....	81
5.13	Überlieferung einer zyklischen Vegetationsvariabilität im Messeler Ölschiefer?.....	87
5.14	Die Konstruktion des theoretischen astronomischen 405k-Jahr-Zyklus an oberpermischen Sedimentfolgen in Südchina.....	96
5.15	Numerische Kalibrierung der Dauer der Toarcium-Stufe (Unterjura) mit dem theoretischen astronomischen 405k-Jahr-Zyklus an einer Sedimentfolge im Pariser Becken.....	99
<b>6</b>	<b>Über die Evidenz des Nachweises von Milankovitch-Zyklen – das Milankovitch-Zyklen-Syndrom .....</b>	<b>105</b>
6.1	Lineares orbital-geologisches System: System-Design und Test-Design.....	105
6.2	Vermeintlicher Milankovitch-Zyklen-Test: Von Periodenübereinstimmungen und Zeitreihenanalysen.....	107
6.2.1	Vom Zyklus zur Periode zum Vergleich .....	107
6.2.2	Über die Zeitreihenanalyse zum Zyklus?.....	109
6.3	Orbitales (Milankovitch-) Tuning: Von der Theorie zum Zirkelschluss.....	113
6.4	Orbitale (Milankovitch-) Steuerung: Von einer Mutmaßung zu einer Tatsache .....	114
6.5	Datierung mit astronomischen (Milankovitch-) Zyklen? .....	116
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>118</b>
<b>8</b>	<b>Schlussfolgerung .....</b>	<b>120</b>
<b>9</b>	<b>Verzeichnis der Abkürzungen .....</b>	<b>120</b>
<b>10</b>	<b>Glossar.....</b>	<b>121</b>
<b>11</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>124</b>
<b>12</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>125</b>
<b>13</b>	<b>Bildnachweis.....</b>	<b>126</b>
<b>14</b>	<b>Datennachweis .....</b>	<b>126</b>
<b>15</b>	<b>Dank .....</b>	<b>127</b>
<b>16</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>127</b>



## 1 Fragestellung

Es gilt als weithin anerkannt, dass quasi-periodische Oszillationen in der Position von Erde und Sonne, sogenannte Milankovitch-Zyklen, in der geologischen Vergangenheit signifikante Variationen des Klimas verursacht haben. Diese astronomisch erzwungenen klimatischen Veränderungen wiederum bewirkten eine klimatisch-sensitive Sedimentation, die sich in der (zyklisch-) stratigraphischen Überlieferung zeigt.<sup>1</sup>

Die Untersuchung dieser Art sedimentärer Zyklen geschieht durch die Zyκλοstratigraphie. Die astronomische Kalibrierung solcher Zyklen führt zur Astrochronologie und der Konstruktion der Astronomischen Zeitskala.

Zyκλοstratigraphie und Astrochronologie allerdings gründen auf fundamentale Voraussetzungen: Die einleitenden zwei Sätze können auch als Basisannahmen gelesen und verstanden werden. Die theoretischen Milankovitch-Zyklen (Hauptzyklen) haben eine rechnerische Dauer von 19 bzw. 24 (Präzession), 41 (Obliquität) und 99 bzw. 405 (Exzentrizität) Tausend [astronomischen] Jahren<sup>2</sup>. Unsere Beobachtungsdaten allerdings reichen nur etwa 300 Jahre zurück. Mit der astrochronologischen Methode wird also der Versuch unternommen, über eine Extrapolation der rechnerisch ermittelten Erdbahnvariationen in die Vergangenheit [theoretische] langperiodische Zyklen zu generieren und diese für Datierungszwecke zu nutzen.

Es stellt sich die Frage, ob und gegebenenfalls wie die theoretischen Milankovitch-Zyklen konkret identifiziert bzw. nachgewiesen werden. Es kann weiter gefragt werden, ob mit der astrochronologischen Methode eine valide Zeitskala konstruiert werden kann.

---

<sup>1</sup> Nach HINNOV UND HILGEN (2012, 63).

<sup>2</sup> Zu den unterschiedlichen Abkürzungen und Schreibweisen von Jahreszahlen siehe Kap. 10 unter Stichwort *Zeitangaben*.

## 2 Einführung

### 2.1 Sedimentfolgen und Zyklen

Eine Sedimentfolge<sup>3</sup> besteht aus mehreren übereinander lagernden Schichten (Schichtenfolge). *Sedimentfolge* soll als rein beschreibender Begriff verstanden werden.

Mit der Unterteilung von Sedimentfolgen und der Beschreibung und Ausgliederung von Schichtungstypen beginnt bereits einer interpretativer Prozess. Nach EINSELE et al. (1991, 4) können verschiedene *sedimentäre Sequenzen* aus folgenden Schichtungstypen bestehen:

- (1) Zwei alternierende Schichttypen (bed types)<sup>4</sup> (Abfolge AB, AB, etc.), die als rhythmische oder zyklische Schichtung bezeichnet werden können, oder als *rhythmische Sequenz*.
- (2) Mehrere unterschiedliche Sedimenttypen (sediment types), mindestens drei, die eine sich wiederholende Abfolge bilden (z.B. ABC, ABC, etc.), eine *zyklische Sequenz*.

Es soll sich hierbei um eine primär deskriptive Ansprache einer Sedimentfolge handeln, die sowohl im Feld (häufig im Meter- bis Zehnermeter-Bereich) als auch auf Bohrkerne angewendet werden kann, „(...) ohne jegliche Information zu Genese, Sedimentationsraten oder assoziierte Zeitspannen“. Dennoch scheinen EINSELE et al. (1991) mit der Verwendung des Begriffs Sequenz ihre Terminologie in das interpretative Modell der Sequenzstratigraphie (VAIL et al. 1977, 1991)<sup>5</sup> einzubinden.

Genetisch unterscheiden EINSELE et al. (1991, 7) zwei Gruppen von Mechanismen – Autozyklizität und Allozyklizität –, die zu rhythmischen oder zyklischen Sequenzen führen (nach BEERBOWER 1964):

- (1) *Autozyklische Sequenzen* sind primär von Prozessen kontrolliert, die im sedimentären System (prism) selbst (z. B. eines Beckens) stattfinden; bspw. nicht-periodische Tempestite<sup>6</sup>, Turbidit-Sequenzen).
- (2) *Allozyklische Sequenzen* sind hauptsächlich verursacht von Variationen außerhalb des zu betrachtenden sedimentären Systems; bspw. klimatische Wechsel, tektonische Bewegungen (im Quellgebiet), globale Meeresspiegelschwankungen.

Die beschreibende Anwendung der Begriffe *Zyklus* und *zyklisch* implizieren DOTT (1982, 10) zufolge bereits das Vorliegen einer Periodizität; ihre Anwendung ist deshalb zu beanstanden. Hinsichtlich der Vorgehensweise der Interpretation von Sedimentfolgen fasst er seine Beobachtungen wie folgt zusammen (S. 20): „Unterbewusst tendieren wir dazu, Kontinuität gegenüber Diskontinuität, graduellen gegenüber abrupten Wechsel und Durchschnittskonditionen gegenüber Extremen zu favorisieren; Zyklizität – eine spezielle Form der

---

<sup>3</sup> Bezieht sich sowohl auf unverfestigte (Sedimente) als auch verfestigte (Sedimentgesteine) Einheiten.

<sup>4</sup> Fallweise werden die englischen bzw. US-amerikanischen Originalbegriffe ohne Anführungszeichen in Klammer nachgestellt, zur Ergänzung oder Klarstellung oder weil es mehrere Möglichkeiten der Übersetzung gibt.

<sup>5</sup> Im Rahmen der Sequenzstratigraphie unterscheiden VAIL et al. (1991) Ablagerungssequenzen als Zyklen 1. bis 6. Ordnung. Diese Gliederung basiert primär auf Zeitperioden; die jeweiligen Perioden errechnen sich aus der radiometrisch geeichten geologischen Langzeitskala.

<sup>6</sup> Ablagerungen, die als Sturmereignisse interpretiert werden.

Uniformität – wird zu schnell aktiviert, um Sequenzen alternierender Lithologie zu erklären.“<sup>7</sup> Zuvor hatte er bereits erwähnt (S. 6), dass wahre Zyklizität (true cyclicity) eines rigorosen Tests (u. a. Spektralanalyse, siehe Abschnitt 4.3) bedürfe. Eine nachweisbare Prädisposition zum Ausweis von Zyklen zeigt ZELLER (1964) in *Cycles and Psychology* auf.

SCHWARZACHER (1993, 4) definiert einen *sedimentären Zyklus* zunächst als eine Gruppe unterschiedlicher Lithologien oder Texturen, die sich regelmäßig in einer Sequenz wiederholen. Als *wahre sedimentäre Zyklen* (true sedimentary cycles) bezeichnet er solche, die von einem oszillierenden System gesteuert werden; dies könne von episodischen<sup>8</sup> Prozessen nicht angenommen werden.

## 2.2 Zyклоstratigraphie

Zyклоstratigraphie<sup>9</sup> ist eine (neue) Subdisziplin der Stratigraphie. Sie befasst sich „(...) mit der Identifikation, Charakterisierung, Korrelation und Interpretation zyklischer Variationen in der stratigraphischen Überlieferung und, im Besonderen mit ihrer Anwendung in der Geochronologie, mit der Verbesserung der Genauigkeit und Auflösung Zeit-stratigraphischer Rahmenwerke. Für Letzteres nutzt sie astronomische Zyklen bekannter Periodizitäten, um die sedimentäre Überlieferung zu datieren und zu interpretieren. Die wichtigsten dieser Zyklen sind die Erd-Orbitalzyklen der Präzession, Obliquität und Exzentrizität (Milankovitch-Zyklen) (...)“ (STRASSER et al. 2006, 75).

Zyклоstratigraphie wird weiter als *stratigraphisches Konzept*, *stratigraphische Methode* und *stratigraphisches Werkzeug* bezeichnet. Es ist ein Interpretations-Konzept; es „(...) nutzt astronomische Zyklen bekannter Periodizität, um sich wiederholende Muster der stratigraphischen Überlieferung zu interpretieren“ (STRASSER et al. 2006, 76).

## 2.3 Milankovitch-Theorie

Aufgrund seiner theoretischen Rückrechnung der astronomischen Bewegungen der Erde über 600 (bzw. 1.000) Jahrtausende leitete MILANKOVITCH<sup>10</sup> (1920, 1941) die jeweilige Sonnenstrahlung (Insolation)<sup>11</sup> und den Strahlungsverlauf ab und unternahm als erster den Ver-

---

<sup>7</sup> DOTT (1982, 22) glaubt, dass die sedimentäre Überlieferung vorwiegend episodische Ereignisse (z. B. Turbidite) abbildet: „I believe that the sedimentary record is mostly a record of episodic events and that in many sequences gaps represent more time than the preserved strata.“

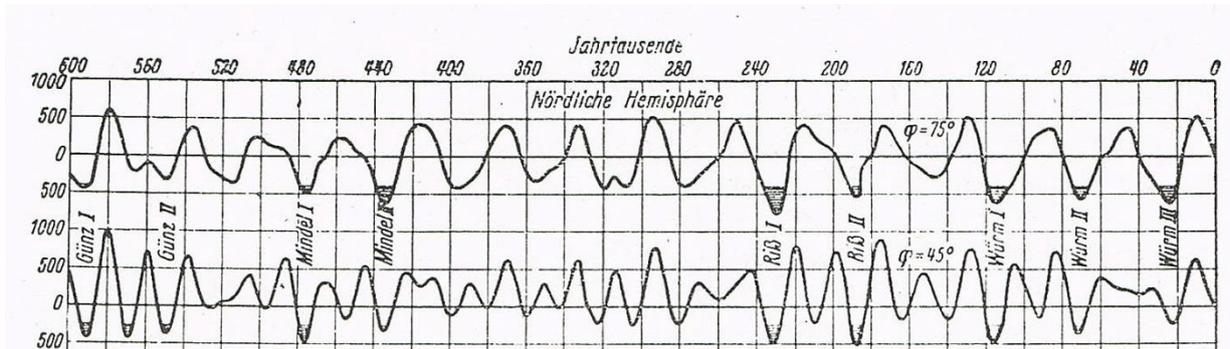
<sup>8</sup> Sporadisch, kurzzeitig; Ereignis-induzierte Ablagerungen (nach dargestellter Charakterisierung autozyklisch). Siehe auch Fußnote 7.

<sup>9</sup> Der Begriff Zyклоstratigraphie ist etwa seit 1988 in Gebrauch.

<sup>10</sup> Milutin MILANKOVITCH (1879-1958) war ein serbischer Mathematiker; es gibt verschiedene Schreibweisen, u. a. Milanković (Original).

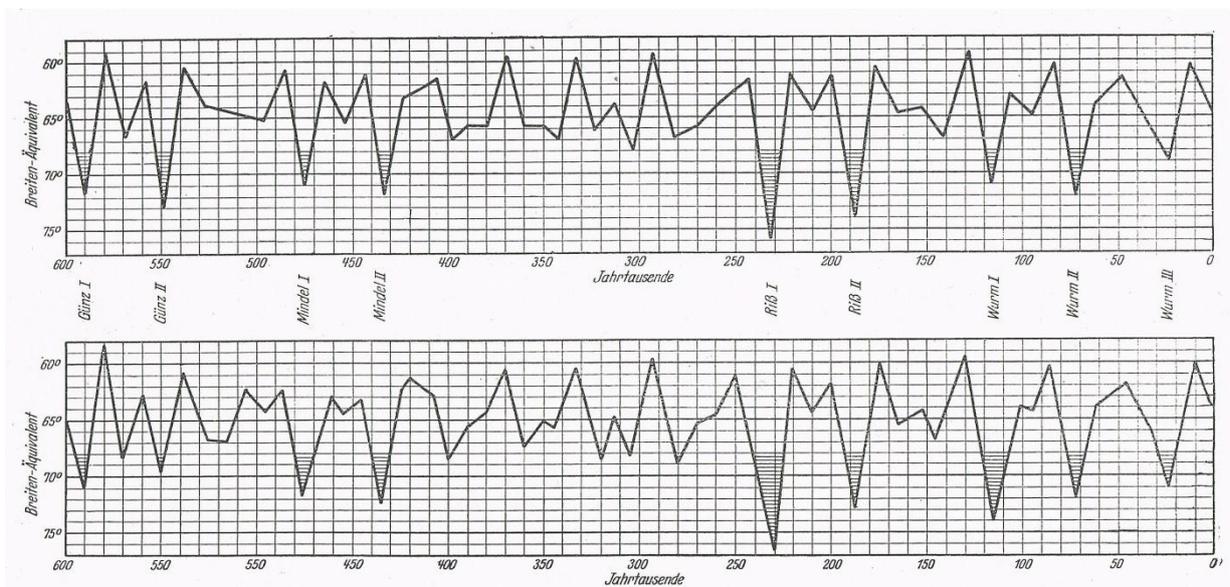
<sup>11</sup> In kanonischen (kalorischen) Einheiten, Schwankungsbreite etwa -500 bis +500 (MILANKOVITCH 1941); entspricht einer Schwankung von etwa max. 50 Watt/m<sup>2</sup> auf einem Niveau zwischen etwa 350 und 400 Watt/m<sup>2</sup> (HINNOV & HILGEN 2012, 69, ihre Fig. 4.5).

such, die kalkulierten Insolationsminima quantitativ mit der (spät-) quartären (konstruierten) Eiszeitgliederung der Alpen<sup>12</sup> zu korrelieren (Abb. 1 und Abb. 2).



**Abb. 1** MILANKOVITCHS Kurven der sommerlichen Bestrahlung, 75°/45° nördliche Breite.

Theoretisch rückgerechnet über 600 Jahrtausende und Korrelationen mit der (spät-) quartären Eiszeitgliederung der Alpen. Aus MILANKOVITCH (1941, 608, Fig. 55), oberen zwei Kurven; Ordinate: kanonische Strahlungseinheiten, siehe Fußnote 11.



**Abb. 2** MILANKOVITCHS Kurve der sommerlichen Bestrahlung, 65° nördliche Breite.

Theoretisch rückgerechnet über 600 Jahrtausende und Korrelationen mit der (spät-) quartären Eiszeitgliederung der Alpen, Bezugsgröße ist 65° nördliche Breite. Aus MILANKOVITCH 1941, 544, Fig. 48, oben: Diagramm von 1920, unten: neues Diagramm mit aktualisierten Berechnungen.

Dieser (vermutete) kausale Grund-Zusammenhang, dass Variationen der Erdumlaufbahn die Eiszeiten<sup>13</sup> (bzw. das Klima überhaupt) gesteuert haben sollen (MILANKOVITCH 1930), wird als *Milankovitch-Theorie* (bzw. *Milankovitch-Theorie des Klimawechsels*), *Orbital-Theorie* oder *astronomische Theorie der Eiszeiten* bezeichnet. Stehen die Prozesse im Vordergrund, werden häufig die Begriffe *orbitale Steuerung* (bzw. Antrieb; *orbital forcing*, OF),

<sup>12</sup> Bei seinen Zuweisungen folgte MILANKOVITCH den Vorstellungen und dem geologischen Altersrahmen seiner Zeit, z. B. PENCK & BRÜCKNER (1901-09).

<sup>13</sup> Eine Diskussion der Eiszeit-Theorien ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

*Milankovitch-Steuerung (Milankovitch forcing, MF)* oder auch *Theorie der astronomischen Steuerung (astronomical forcing theory)* verwendet.

Die theoretischen astronomischen Zyklen der Präzession, Obliquität und Exzentrizität werden seit den 1970er-Jahren auch als Milankovitch-Zyklen bezeichnet.

## 2.4 Astronomische Parameter der Erde

Messungen und Extrapolationen zufolge soll die Erde – ausgelöst durch die Interaktion der Himmelskörper des Sonnensystems – quasi-periodische Wechsel in ihrer Orientierung relativ zur Sonne vollziehen. Diese u. a. als astronomische Parameter der Erde (Orbitalparameter, Milankovitch-Zyklen) bezeichneten Schwankungen haben unterschiedliche Ursachen und Prägungen (Werte nach HINNOV & HILGEN 2012, 64):

- Präzession (P): Schwingung der Erdachse um die Senkrechte auf der Erdbahnebene (Taubelbewegung wie bei einem Kinderkreisel); errechnete Haupt-Zyklen: 19 bzw. 24 Tausend [astronomische] Jahre und weitere.
- Obliquität (O): Neigung der Erdachse gegen die Erdbahnebene (Erdschiefe); errechnete Neigungsspanne: 22°-24° (aktuell 23,44°); errechneter Haupt-Zyklus: 41 Tausend [astronomische] Jahre.
- Exzentrizität (E): Maß für die Abweichung der Erdumlaufbahn von einer Kreisbahn (hier um die Sonne); errechnete Spanne: 0-0,07 (aktuell 0,0167); errechnete Haupt-Zyklen: 99 bzw. 405 Tausend [astronomische] Jahre und weitere.

Die Beobachtungsdaten der astronomischen Bewegungen der Erde beziehen sich allerdings nur auf wenige Jahrhunderte.

## 2.5 Astrochronologie und Astronomische Zeitskala

Die Astronomische Zeitskala (Astronomic Time Scale, ATS) basiert auf einer theoretischen Zeitskala des astrochronologischen Modells, einer mit den (theoretischen) Milankovitch-Zyklen rückextrapolierten, durchgängigen Skala bis zu 250 Millionen [astronomische] Jahre (LASKAR et al. 2004, 2011; z. B. 614 Perioden des theoretischen 405k-Jahr<sup>14</sup>-Metronoms<sup>15</sup>, s. o.). Die Konstruktion der Astronomischen Zeitskala erfolgt durch Anwendung der astrochronologischen Methode, der (Ziel-) Eichung (vermeintlich) zyklischer Sedimentfolgen (Zyklostratigraphie) auf die astronomische Skala (HINNOV & OGG 2007). Erst durch diese abschnittsweise Befüllung wird die Astronomische Zeitskala belebt („aufgeladen“). Auf diese Weise ist bereits der Großteil des Käno- und Mesozoikums – häufig an nur wenigen Lokalitäten – astronomisch kalibriert worden (HINNOV & HILGEN 2012, 72-73):

- Gegenwart bis Grenze Oligozän/Eozän (0-34 Millionen [radiometrische] Jahre); vollständig, d. h. auf alle [theoretische] astronomische Zyklen.

---

<sup>14</sup> Siehe Fußnote 2.

<sup>15</sup> Metronom: Taktmesser.

- Eozän bis Grenze Kreide/Paläozän; auf [theoretische] Exzentrizitätszyklen.
- Kreide bis Grenze Perm/Trias; auf den [theoretischen] 405k-Jahr-Exzentrizitätszyklus (Abdeckung etwa 75%).

Das aktuell längerfristige Ziel der Astrochronologie ist, der Zyклоstratigraphie die entsprechenden [theoretischen] astronomischen 405k-Jahr-Einheiten (Metronome, auch als Bins bezeichnet) zuzuweisen; mit Zuweisen ist Tunen gemeint<sup>16</sup> (Tuning siehe Kap. 4).

### 3 Kurzer historischer Abriss

Bei der Suche nach einer Ursache der pleistozänen Vereisung (und ihrer Oszillationen, die Eiszeiten) war bereits im 19. Jahrhundert die Vorstellung eines (möglichen) exogenen Einflusses durch Veränderungen der Erdumlaufbahn verbreitet, die u. a. ADHÉMAR (1842), CROLL (1864) und LYELL (1867) diskutierten. FISCHER et al. (2004, 5) zufolge hatte CROLL (bereits) 1875 die grundlegenden Prinzipien einer Orbitalsteuerung entdeckt.<sup>17</sup>

Als prominente (erste) Untersuchungen mit einem zyклоstratigraphischen Schwerpunkt werden in der Rückschau häufig folgende Arbeiten genannt<sup>18</sup>:

- Oberkretazische Kalk-Mergel-Wechselagerung in Colorado (GILBERT 1895): Zuweisung des theoretischen Präzessionszyklus (siehe Abschnitt 5.1).
- Eozäne Green River Formation (BRADLEY 1929): Zuweisung einer Jahresrhythmik (Warvierung) sowie Zuweisung des theoretischen Präzessionszyklus (siehe Abschnitt 5.2).
- Spättriassischer Dachsteinkalk (SCHWARZACHER 1947): „Lofer-Zyklen“ (Lofer-Zyklothem); die Rhythmik soll von oszillierenden Meeresspiegelschwankungen im Takt von 40.000 [radiometrischen] Jahren herrühren. Die Entstehung wird noch immer diskutiert (FISCHER 1964, SCHWARZACHER 1993, ENOS & SAMANKASSOU 1998, COZZI et al. 2005).

Die erste (qualitative) Korrelation zwischen berechneter Insolationsminima (MILANKOVITCH 1920) und der (spät-) quartären Eiszeitgliederung der Alpen erfolgte durch KÖPPEN & WEGENER (1924), auf quantitativer Ebene später durch MILANKOVITCH selbst (1941); – jeweils durch Zuweisung. Mit der Inkonsistenz zu radiokarbondatierten Glazialereignissen in Nordamerika geriet die astronomische Theorie ins Abseits. Die systematische Aufnahme spätquartärer Tiefsee-Sedimente ab den 1950er-Jahren, insbesondere die Suche nach einem erklärenden Mechanismus für die Oszillationsmuster ihrer Sauerstoffisotopen-Reihen, rückte die Milankovitch-Theorie erneut in den Fokus (EMILIANI 1955, 1966). Sie erlangte einen nachhaltigen Schub durch die Science-Veröffentlichung *Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages* von HAYS, IMBRIE & SHACKELTON (1976) (siehe Abschnitt 5.3). Die kurz als „Pacemaker“-Studie bezeichnete Arbeit gilt als Meilenstein (landmark) und Maßstab (benchmark) zugleich. Sie beeinflusste maßgeblich die nachfolgende, explosive Entwicklung, die u. a. in

<sup>16</sup> „The long-term goal of astrochronology is to assign (‘tune’) cyclostratigraphy to the appropriate 405-kyr bins“ (HINNOV & HILGEN 2012, 67).

<sup>17</sup> Es müsste formuliert bzw. postuliert heißen.

<sup>18</sup> Teilweise nach STRASSER et al. (2006), FISCHER et al. (2004) und HINNOV & HILGEN (2012).

den Subdisziplinen Paläoklimatologie, Zyklusstratigraphie und Astrochronologie Ausdruck findet.

## 4 Zyklusstratigraphische Methodik

### 4.1 Vorgehensweise

Nach BERGER et al. (1992) umfasst die astronomische Theorie (bzw. Milankovitch-Theorie) hauptsächlich vier verschiedene Teile<sup>19</sup>:

- (1) Die theoretische Berechnung der Langzeit-Variationen der Erdbahnparameter und ihre zugehörigen geometrischen Insolationen;
- (2) das Design von Klimamodellen, um diese Insolationen in Klima zu transformieren;
- (3) die Sammlung geologischer Daten und ihre klimatische Interpretation;
- (4) und der Vergleich dieser Proxy-Daten mit den simulierten klimatischen Variablen.

Um vertrauenswürdige Ergebnisse zu erzielen, schlagen STRASSER et al. (2006, 81-82) zwei Methoden in Kombination vor:

- (1) Die Notwendigkeit einer unabhängigen Zeitkontrolle, um das zu untersuchende Zeitintervall, in welchem die zyklusstratigraphische Studie durchgeführt wird, einzuschränken. Dies könne durch direkte radiometrische Altersdatierung oder durch Biostratigraphie, Chemostratigraphie, Magnetostratigraphie und/oder Sequenzstratigraphie, die auf radiometrische Altersdaten kalibriert sind, erfolgen.
- (2) Die Analyse des hierarchischen „Stapel“-Musters. Ein Verhältnis von – vereinfacht – 1:5:20 (entsprechend den überschlägigen [theoretischen] Milankovitch-Zyklen von 20k/100k/400k [astronomischen] Jahren), wonach die stratigraphische Überlieferung analysiert werden kann.

Schließlich gelte es zu demonstrieren – quasi als Test –, dass die beobachteten Wechsel, die identifizierten sich wiederholenden Muster in der sedimentären Überlieferung, in der Tat (indeed) in Beziehung zu den Orbitalparametern der Erde stehen: durch unabhängig datierte Ankerpunkte (s. o.) und Zeitreihenanalysen (siehe Abschnitte 4.2 und 4.3).<sup>20</sup>

### 4.2 Sammlung von Daten

Für die Analyse von Zeitreihen bedarf es zunächst Wertereihen. Die Wertereihendaten werden durch stratigraphische, (geo)physikalische, (geo)chemische oder biologische Reihenmessungen direkt am Sedimentgestein (Aufschlüsse; Bohrkerne/Bohrlöcher, auch Eiskerne) oder an entnommenen Proben (im Labor) gewonnen. Die Wertereihen bestehen aus einer Variab-

---

<sup>19</sup> „The astronomical theory comprises mainly four different parts: the theoretical computation of the long-term variations of the Earth’s orbital parameters and related geometrical insolation, the design of climatic models to transform these insolation into climate, the collection of geological data and their interpretation in terms of climate, and the comparison of these proxy data to the simulated climatic variables” BERGER et al. (1992, 560).

<sup>20</sup> „If it can be demonstrated – through independently dated tie points and time series analysis – that the observed changes are indeed related to the orbital cycles (...)” (STRASSER et al. 2006, 104).

len, einem *sedimentären Parameter*, in Bezug zur Tiefe (Profil bzw. Bohrkern). Typische Variablen sind:

- Schichtdicken<sup>21</sup>, „Zyklen“dicken;
- Fossilkonzentrationen (%-Werte, z. B. *Cycladophora davisiana*, auch Pollen);
- Elementkonzentrationen ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta\text{D}$ , Fe, etc.);
- $\text{CaCO}_3$ -Gehalt;
- (Fossile) Oberflächenwassertemperatur (T oder SST, sea-surface temperature), unter Annahmen errechneter Wert;
- Kohlenstoffgehalt, gesamt oder organischer Anteil; isotopisch ( $\delta^{13}\text{C}$ , s. o.);
- Magnetische Suszeptibilität (MS), anhysteretische remanente Magnetisierung (ARM);
- Gamma-Ray-Log (GR);
- Grau- bzw. Farbwerte (Lithologie);
- Spurenstoffkonzentrationen ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , etc.) (Eiskern);
- Staubkonzentrationen (Eiskern).

Datenkollektive einiger der oben gelisteten Variablen werden auch als Proxies, Proxy-Signale oder Proxy-Daten bezeichnet; sie werden als „Stellvertreter“-Daten aufgefasst und häufig als indirekte Anzeiger des Paläoklimas interpretiert.

### 4.3 Zeitreihenanalyse

Die Wertereihen und/oder die in Zeitreihen überführten Wertereihen werden spektralanalytisch auf das Vorhandensein von Zyklen untersucht und ggf. während der Überführung oder danach getunt (siehe Abschnitt 4.4).

Der spektralen Varianzanalyse liegt die Transformation<sup>22</sup> einer Zeitreihe (bzw. Zeitfunktion) in eine spektrale oder Wavelet-Darstellung zugrunde. Hierzu gibt es zahlreiche Berechnungsmodelle und Techniken. Die resultierenden Varianzspektren (auch als Power-, Energie- oder Leistungsspektren bezeichnet) sind Schätzungen; die relative Varianz ist auf der Ordinate, die Frequenz auf der Abszisse dargestellt. Übliche Modelle/Darstellungen sind:

- Periodogramm;
- Lomb-Periodogramm (LOMB 1976; SCARGLE 1982, 1989);
- Multi-taper method (MTM) (THOMSON 1982, 1990);
- Blackman-Tukey method (BTM) (BLACKMAN & TUKEY 1958, TUKEY 1967);
- Maximum entropy method (MEM);
- RedFit.

Bei der Wavelet-Darstellung handelt es sich um eine kontinuierliche raum- bzw. zeitaufgelöste spektrale Darstellung, die die Veränderung der relativen Varianz (Ordinate) mit der Tiefe bzw. Zeit (Abszisse) zeigt.

<sup>21</sup> Die Begriffe *Dicke* und *Mächtigkeit* werden in diesem Kontext synonym verwendet.

<sup>22</sup> Im diesem Zusammenhang wird häufig die Abkürzung FFT verwendet, schnelle FOURIER-Transformation (engl. fast FOURIER transform).

Die Spektren gilt es jeweils im Gesamtkontext der zugrundeliegenden Annahmen, des zu untersuchenden stratigraphischen Abschnittes, der einzelnen Prozessschritte von der Datensammlung (Stichprobe) über die Datenaufbereitung/-veränderung, der Alters-zu-Tiefen-Transformation und eines ggf. durchgeführten Tunings und nicht zuletzt der spektralen Darstellung selbst zu interpretieren (siehe Kap. 5 und 6).

Umfangreiche technisch-methodische Ausführungen finden sich u. a. bei MULLER & MACDONALD (2000), WEEDON (2003), HAMMER (2012) und SCHÖNWIESE (2013).

Der Verfasser verwendet für die Zeitreihenanalyse das Statistik-Paket PAST von Ø. HAMMER (2010, 2012).

## 4.4 Tuning

Der Begriff Tuning (Einphasung<sup>23</sup>) wird von MULLER & MACDONALD (2000, 143) wie folgt erklärt: „Tuning ist der Prozess der Verfeinerung einer Zeitskala unter Ausnutzung bekannter Periodizitäten von Proxy-Signalen.“ Demnach bedarf es für den Einphasungs-Prozess einer bereits bestehenden Zeitskala.

Sie schreiben weiter: „Als der Begriff von HAYS et al. (1976) benutzt wurde, war die Annahme, dass eine annähernde Zeitskala bereits existierte, basierend auf einer linearen Interpolation zwischen radiometrischen Ankerpunkten. Diese Zeitskala konnte unter Ausnutzung des Fakts ‚eingephas‘ werden, dass die in den Daten vorhandenen Zyklen astronomischen Zyklen entsprechen sollten. HAYS et al. (S. 1130) gaben sich die Mühe zu betonen, dass ihr Tuning-Prozess die Zeitskala nur geringfügig, ‚innerhalb der absoluten Fehlergrenze der radiometrischen Daten‘, adjustierte. Das ursprüngliche Ziel war, eine Zeitskala feinabzustimmen, welche mit anderen Mitteln festgelegt wurde.“

### ***Tuning-Prozedere***

Das Tuning-Prozedere folgt einem Grundmuster. Die einzelnen Schritte beschreiben bspw. MULLER & MACDONALD (2000, 144):

- Wahl radiometrischer Ankerpunkte, z. B. radiometrisch datierte geomagnetische Polaritätswechsel (u. a. Brunhes/Matuyama).
- Wahl einer Zielkurve oder einer Vorlage (template), die auf die Daten passen sollte. Aus der Fülle der Literatur werden genannt:
  - Insolation, z. B. PETIT et al. (1999);
  - Obliquität, z. B. BERGER et al. (1993);
  - Nonlineares Eismodel, z. B. BERGER et al. (1995);
  - Exzentrizität, Obliquität und Präzession, z. B. IMBRIE et al. (1984);
  - Präzession, z. B. SHACKLETON et al. (1990);
  - Obliquität und Präzession, z. B. RUDDIMAN et al. (1989);
  - Bisherig getunte Datensätze, z. B. TIEDEMANN et al. (1994).

<sup>23</sup> In diesem Kontext auch mit Einpassung oder Einzeitung zu übersetzen.

- Filterung der Daten und/oder des Ziels. Beim Tuning auf ein schwaches Signal (z. B. Präzession) in Gegenwart eines starken Signals ist entweder das unerwünschte Signal zu beseitigen oder das gewünschte Signal unter Anwendung eines Bandpassfilters zu isolieren.
- Auswahl der Kontrollpunkte; das sind die Teufen (Kernbohrtiefen), denen ein Alter zugewiesen wird. Dieser Satz von Wertepaaren (Tiefe, Alter) bildet die *Tuningkurve*.
- Anpassung der Alter. Dies geschieht zur Optimierung der Übereinstimmung (match) zwischen den Daten und dem Ziel. Dazu gibt es verschiedene Wege:
  - Abgleichung des Spektrums;
  - Abgleich von Ereignissen, z. B. Terminationen;
  - Maximierung der Kreuzkorrelation oder der Kohärenz;
  - Abgleichung der Phasen (insbesondere wenn Filter angewendet werden).

Die nachfolgenden zwei Beispiele (Abschnitte 4.5 und 4.6) zeigen u. a., wie intensiv die Ursprungsdaten beim Tuning verändert werden.

#### 4.5 Tuning-Fallbeispiel I: Konstruktion einer $\delta^{18}\text{O}$ -basierten Referenz-Zeitskala für das Oberpleistozän (SPECMAP)

Die Beobachtungen der Sauerstoffisotopenverhältnisse ( $\delta^{18}\text{O}$ ) in fünf Sedimentkernen der Tiefsee liefern nach IMBRIE et al. (1984) eine Basis sowohl für die Entwicklung einer geologischen Zeitskala für die vergangenen 780.000 [radiometrischen] Jahre als auch zur Evaluierung der Orbitaltheorie der pleistozänen Eiszeiten.<sup>24</sup>

Mit ihrer Arbeit begründeten IMBRIE et al. nicht nur eine über zwei Jahrzehnte beeinflussende Zeitskala (SPECMAP), sondern sie schufen einen Prototyp für spätere Tuning-Aktivitäten (vgl. MULLER & MACDONALD 2000, 149).

Bohrkern	Koordinaten	Region	Wassertiefe [m]	Kernlänge [cm]	Ø Probenintervall [cm]	Ca.-Anzahl $\delta^{18}\text{O}$ -Proben
RC11-120	43°S 79°E	Süd-Indik	3193	954	5,0	191
V22-174	10°S 12°W	Süd-Atlantik	2630	1566	9,1	172
V30-40	00°S 23°W	Äquatorial-Atlantik	3706	755	3,1	244
V28-238	01°N 160°E	West-Pazifik	3120	1609	8,0	201
DSDP502b	11°N 79°W	Karibik, N Panama	3051	3584	10,3	348

**Tab. 1** Lokation und Beschreibung der fünf Bohrkern des SPECMAP-Projektes.

Nach IMBRIE et al. (1984, ihre Table 1), die letzten zwei Spalten sind Ergänzungen durch den Verfasser.

#### **Konstruktion der SPECMAP-Zeitskala**

<sup>24</sup> Dem Eingangssatz ihrer Arbeit (IMBRIE et al. 1984, 269) entnommen: „Observations of  $\delta^{18}\text{O}$  in five deep-sea cores provide a basis for developing a geological time scale for the past 780 000 years and for evaluating the orbital theory of Pleistocene ice ages.“

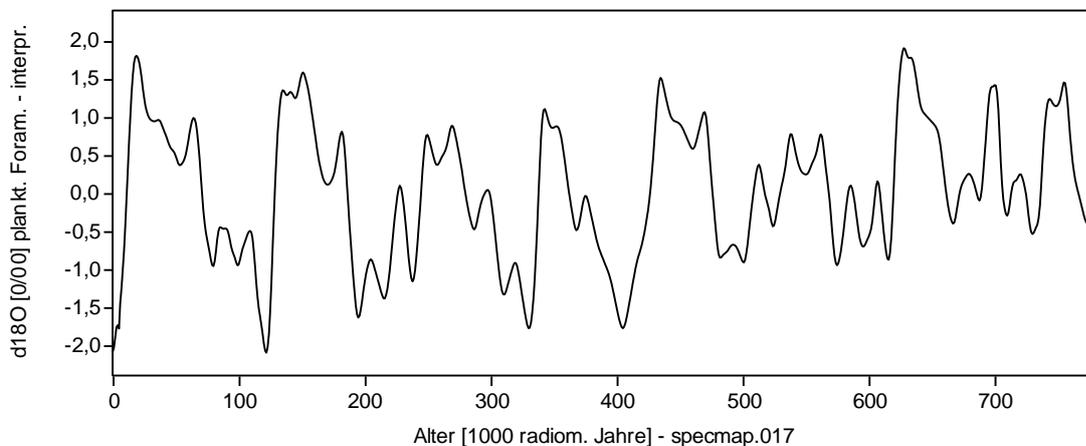
Zur Konstruktion der Referenz-Zeitskala wurden folgende, wesentliche Teilschritte vollzogen (vgl. IMBRIE et al. 1984):

- (1) Stratigraphie (ihre Fig. 4, siehe Tab. 1).
  - a. Messung/Berechnung der  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte planktonischer Foraminiferen aus fünf (global verteilten) Sedimentkernen der Tiefsee [Generierung der Wertereihen]. Graphische Darstellung der Reihen:  $\delta^{18}\text{O}$  (‰) versus Tiefe (m).
  - b. Visuelle Identifizierung und Zuweisung der Brunhes/Matuyama-Grenze zur ersten (einzigen) magnetischen (gemessenen) Umkehr (nur bei den drei längeren Kernen).
  - c. Stratigraphische Übertragung (Korrelation) des vorletzten Glazial-/Interglazial-Übergangs (MIS 6.0) auf alle fünf  $\delta^{18}\text{O}$ -Profile.
- (2) Konstruktion einer initialen Zeitskala (Alters-zu-Tiefen-Transformation; Generierung der Zeitreihen) (ihre Fig. 5).
  - a. Zuweisung eines angenommenen Null-Alters zum jeweiligen Top der Sedimentkerne.
  - b. Übernahme (Übertragung) zweier radiometrischer Alterswerte: MIS 6.0, 127.000 [radiometrische] Jahre; Brunhes/Matuyama-Grenze, 730.000 [radiometrische] Jahre.
  - c. Dehnung/Stauchung der fünf  $\delta^{18}\text{O}$ -Profile zwischen den zwei fixierten Alterspunkten.
  - d. Lineare Interpolation sowie lineare Extrapolation jenseits der Ankerpunkte (Annahme einer gleichförmigen Sedimentationsrate).
- (3) Orbitaltuning (ihre Figs. 2 und 6).
  - a. Wahl der Zielkurven: [theoretische] Perioden von 41 und 23/19 Tausend [astronomischen] Jahren (Obliquität und Präzession).
  - b. Auswahl der Kontrollpunkte (für jede Zeitreihe), dieser Satz von Wertepaaren bildet die Tuningkurve.
  - c. Tuning-(Einphasungs-)Prozess: Filterung der Daten und/oder des Ziels mit [theoretischen] Perioden von 41 und 22 Tausend [astronomischen] Jahren, 120 Iterationen<sup>25</sup> bis zur finalen Zeitskala.
- (4) Graphische Darstellung der Alters-zu-Tiefen-Beziehung der fünf Kerne (ihre Fig. 7).
- (5) Stacking („Stapelung“), Bildung eines Durchschnitts (ihre Fig. 8).
  - a. Normalisierung der  $\delta^{18}\text{O}$ -Reihen zu einem Null-Mittelwert und Ermittlung der Standardabweichung; Abtragung der normalisierten Kurven gegen die neue Zeitskala.
  - b. Interpolation der neuen Zeitreihen zu Intervallen von 1.000 [radiometrischen] Jahren [Erweiterung um zusätzliche zeitinterpretierte Datenpaare].
  - c. Zur Vermeidung atypischer Einflüsse Entfernung kurzer Abschnitte [Entfernung von Datenpaaren] in Stufe 5 (MIS); betrifft drei Kerne.

<sup>25</sup> Der iterative Tuning-Prozess wird als plump (ungainly) bezeichnet.

- d. Bildung einer Durchschnittszeitreihe; Filterung der gestapelten (stacked)  $\delta^{18}\text{O}$ -Zeitreihe mit [theoretischen] Perioden von 41 und 22 Tausend [astronomischen] Jahren; Optimierung des Abgleichens der gefilterten, gestapelten (stacked)  $\delta^{18}\text{O}$ -Zeitreihe sowohl mit der [theoretischen] Präzessions-Zeitreihe als auch der [theoretischen] Obliquitäts-Zeitreihe zur Verbesserung des Altersmodells.
- e. Glättung der finalen Durchschnittszeitreihe mit 9-Punkte-Gauss-Filter, ergibt den geglätteten Durchschnitt (smoothed stack).

Abb. 3 zeigt eine Grafik der final-getunten und geglätteten SPECMAP-Durchschnittszeitreihe. Die spektrale Darstellung der Zeitreihe (Abb. 4a)<sup>26</sup> weist Peaks<sup>27</sup> bei 0,0101/0,0246/0,0424/0,0443/(0,0526) Zyklen/a[r]a aus, diese entsprechen Perioden (1/Frequenz) von 99/41/24/22/(19) k[r]a. Die Peaks – mit Ausnahme des erstgenannten – entsprechen exakt den Frequenzen des theoretischen Obliquitäts- und Präzessionszyklus, mit denen die Zeitreihe getunt worden ist. Das Tuning-Ergebnis entspricht dem Tuning-Ziel. Der signifikante 1. Peak (~100 k[r]a) ergibt sich aus dem Grundmuster der  $\delta^{18}\text{O}$ -Reihe; der Kern RC11-120 (Abb. 7b) zeigt im Vergleich zu Kern V22-174 (Abb. 7a) solch eine starke Prägung. Werden die Rohdaten-Spektral-Signaturen der Kerne V22-174 (Abb. 7a) und RC11-120 (Abb. 7b) mit der Spektral-Signatur des finalen Tuning-Ergebnisses (Abb. 4a) verglichen, kann die starke Veränderung der Rohdatenbasis auch visuell nachempfunden werden.

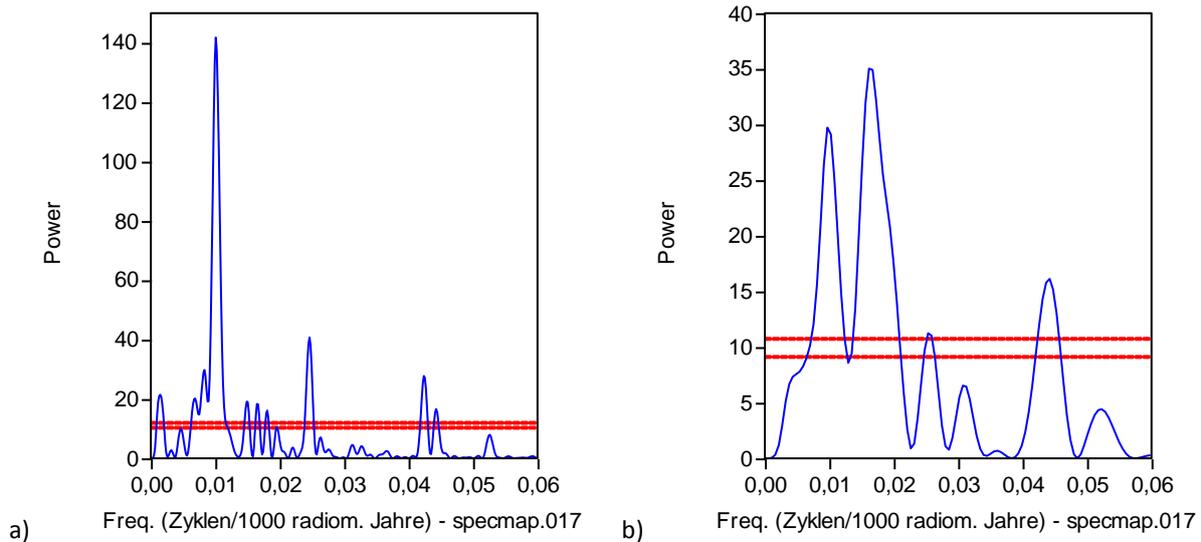


**Abb. 3** SPECMAP-Zeitreihe (oberes Pleistozän).

$\delta^{18}\text{O}$ -basierte, auf [theoretische] Milankovitch-Zyklen getunte Zeitreihe (bis 782.000 [radiometrische] Jahre). Sie diente über zwei Jahrzehnte als Referenz-Zeitskala für das obere Pleistozän und als Tuning-Zielkurve. Das Diagramm ist – mit Ausnahme der üblicherweise inversen Darstellung der Ordinatenwerte – identisch mit Fig. 8 (unten) in IMBRIE et al. (1984, 295). Liniendarstellung,  $n = 783$ ; Datei: specmap.017.

<sup>26</sup> Der Vergleich dieser Abbildung mit dem von MULLER & MACDONALD (2000, 155; ihre Fig. 5.14) abgebildeten SPECMAP-Stack-Spektrum zeigt eine vollkommene Übereinstimmung (identische Signatur); das bestätigt, dass MULLER & MACDONALD die gleiche Datenbasis verwendeten und ebenfalls die spektrale Darstellung in Form des Lomb-Periodogramms bevorzugten.

<sup>27</sup> Der erste Peak wird nicht aufgeführt; die Entstehung dieses Peaks ist unklar.



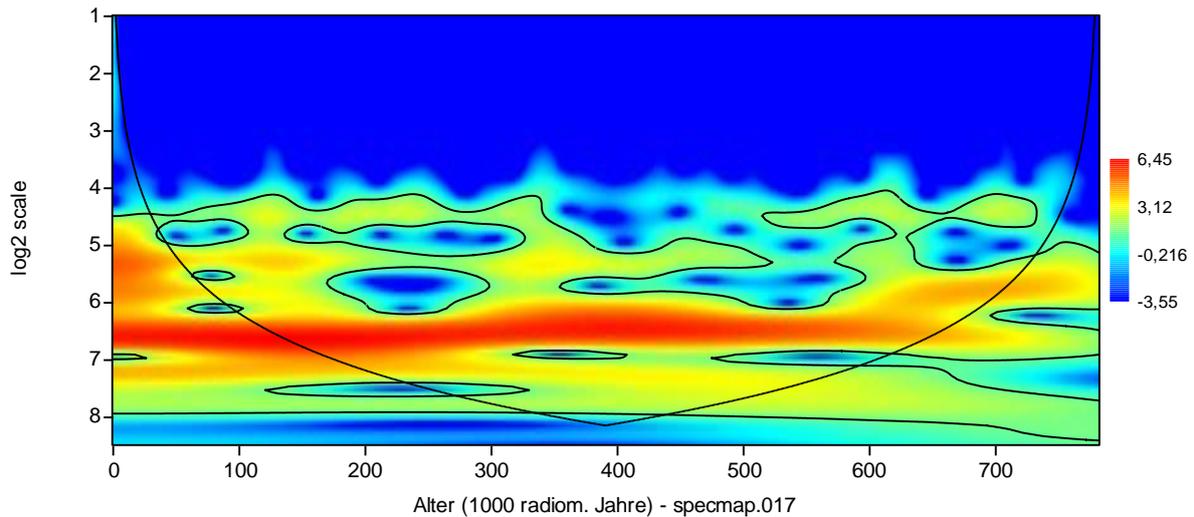
**Abb. 4** Lomb-Periodogramme der SPECMAP-Zeitreihe.

a) Gesamte Zeitreihe, 0-782 k[r]a. Peaks bei 0,0101/0,0246/0,0424/0,0443/(0,0526) Zyklen/k[r]a, entsprechen Perioden von 99/41/24/22/(19) k[r]a. b) Ausschnitt 550-782 k[r]a. Peaks bei 0,0097/0,0162/0,0248/0,0436 Zyklen/k[r]a; Dominanz einer Periode von k[r]a (2. Peak). Tuning-technisch ist das Teil-Spektrum des hinteren (älteren) Abschnitts nicht konsistent mit dem Gesamtspektrum (siehe Textteil und Abb. 5). – Rote Linien: Signifikanz-Level von 95/99% ( $\alpha = 0,05/0,01$ ); Power: relative Varianz; (); Werte unterhalb der Signifikanz-Level. Datei: specmap.017.

### Tuning-Analyse

MULLER & MACDONALD (2000, 150 ff) zeigen auf, dass die SPECMAP-Zeitreihe für den Abschnitt >600.000 [radiometrische] Jahre – Tuning-technisch betrachtet – schwerwiegend falsch (seriously wrong) war. Werden die Spektren für die Abschnitte 0-650 k[r]a und 650-784 k[r]a separat ausgewiesen, zeigt sich für den Abschnitt 650-784 k[r]a eine nicht erklärbare 52 k[r]a-Periode (in Abb. 4b eine 62 k[r]a-Periode, da der Abschnitt hier größer gewählt ist; Abb. 5. zeigt sehr eindrücklich das Auseinanderlaufen/Verschwimmen der Bänder im Endbereich). Wird der erstgenannte Bereich allerdings um den Faktor 1,95 zu 650-910 k[r]a gestreckt, wird der 52 k[r]a-Peak zu einem 100 k[r]a-Peak transformiert. Das ergibt ein höheres Alter der Brunhes/Matuyama-Grenze von  $806 \pm 20$  k[r]a, welches zu den neueren radiometrischen Datierungen passt. Es wird als größter Triumph des Orbitaltunings gewertet – so MULLER & MACDONALD weiter –, dass die höheren Alter von JOHNSEN et al. (1982, 790 k[r]a) und SHACKLETON et al. (1990, +5-7 % in Bezug auf 730 k[r]a) später durch neuere radiometrische Datierungen bestätigt worden sind (BAKSI et al. 1991, 1992; Spell & McDougall 1992).<sup>28</sup>

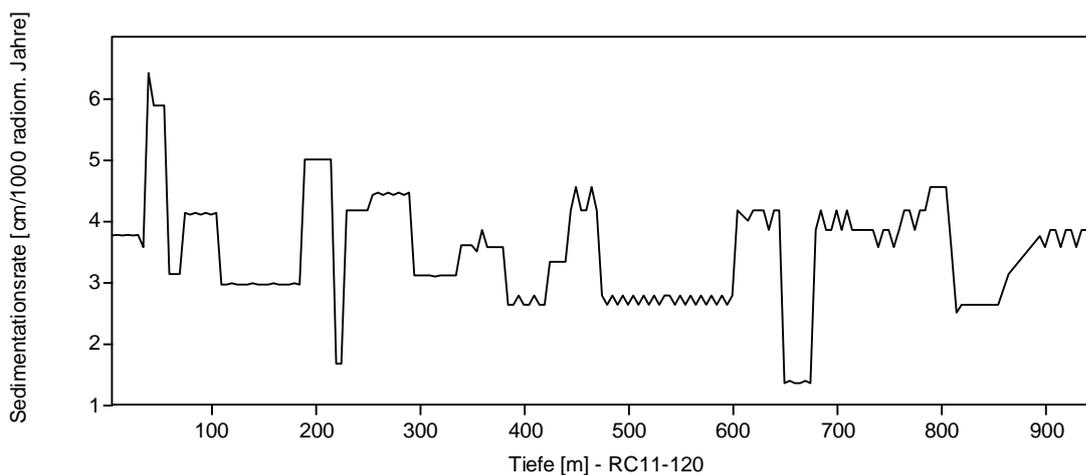
<sup>28</sup> Aktueller Alterswert der Brunhes/Matuyama-Grenze: 0,781 Millionen [radiometrische] Jahre, orbital getunt (GRADSTEIN et al. 2012, Table 5.2, S. 88 ff). – Dieses Beispiel der Datierung eines (globalen) Ereignisses zeigt deutlich die Unsicherheiten und die Spielräume der K/Ar- bzw.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Datierung auf und den wachsenden Einfluss der Zyklustratigraphen und Astrochronologen. Es scheint, als seien die neueren Datierungen zu Gunsten des hinteren Endes entschieden worden, um eine Gleichschaltung mit der zunehmend anerkannten Milankovitch-Theorie vorzunehmen. So BAKSI et al. (1992): „(...) give an age of  $783 \pm 11$  ka, in agreement with the astronomical derived value.“



**Abb. 5** Wavelet-Darstellung der SPECMAP-Zeitreihe.

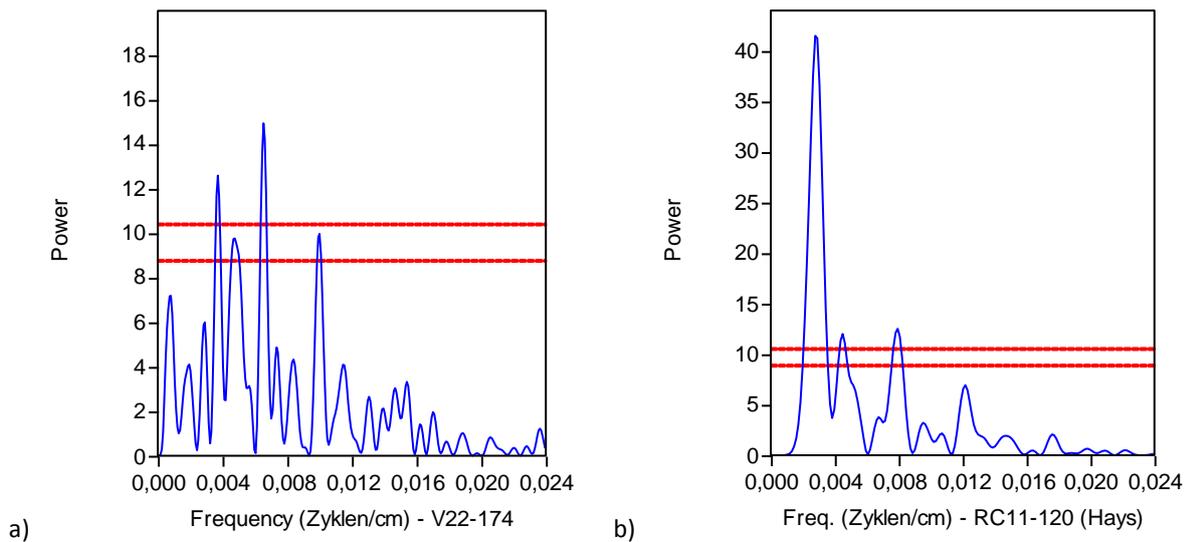
Raum- bzw. zeitaufgelöste Spektraldarstellung (Morlet-Modus); 0-782 k[r]a,  $n = 783$ . Ein deutliches (rotes) Band verläuft bei etwa  $2^{6,6}$  bis  $2^{6,7}$  (log2-Skala), das entspricht einer Periode von etwa 97 bis 104 k[r]a, also  $\sim 100$  k[r]a). Das Band teilt sich  $>600$  k[r]a in zwei Bänder auf, ein Zeichen eines „unvollständigen“ Tunings (siehe Textteil). Zwei undeutliche, nicht durchweg aushaltende horizontale Zonen verlaufen bei etwa  $2^{5,4}$  und  $2^{4,5}$ , entspricht Perioden von etwa 42 und 22 k[r]a. Auf diese ist die Zeitreihe getunt worden. – Umrandungen: Signifikanz-Level 95% ( $\alpha = 0,05$ ); konische Linie („cone of influence“): Markierung der ggf. beeinflussten Randbereiche; Farbskala: relative Intensität. Datei: specmap.017.

Darüber hinaus stellen sie heraus, dass durch den Tuning-Prozess hohe Variationen in der Sedimentationsrate erzeugt worden sind; für zwei Kerne variiert sie um den Faktor 18 bzw. 20. Diese starken Ausschläge in der Sedimentationsrate erachten sie als physikalisch nicht möglich (unphysical). Für Kern RC11-120 zeigt Abb. 6 die variabilisierte Sedimentationsrate.



**Abb. 6** Sedimentationsraten (Kern RC11-120).

Eine nicht-lineare (subjektive) Alters-zu-Tiefen-Transformation, wie hier durch ein Tuning auf theoretische Milankovitch-Zyklen, führt zwangsläufig (bilanztechnisch) zu variablen Sedimentationsraten (Diskussion siehe Textteil). Die durchschnittliche Sedimentationsrate beträgt 3,24 cm/k[r]a. Datei: RC11-120\_isot-tab.txt.



**Abb. 7** Lomb-Periodogramme der  $\delta^{18}\text{O}$ -Wertereihen (Kern V22-174, RC11-120).

Spektrale Analyse der Rohdaten von zwei der fünf Sedimentkerne, auf welche die SPECMAP-Zeitreihe gründet (Diskussion siehe Textteil). a) Kern V22-174 (Datei: specmap.006). b) Kern RC11-120 (Datei: RC11-120\_isotab.txt). Peaks: 0,00278/0,00450/0,00794/(0,01217) Zyklen/cm, entsprechen Perioden von 3,59/2,22/1,26/(0,82) m. – Rote Linien: Signifikanz-Level von 95/99% ( $\alpha = 0,05/0,01$ ); Power: relative Varianz; ( ): Werte unterhalb der Signifikanz-Level. Datei: specmap.017.

### Folgschwerer Zirkelschluss

IMBRIE et al. (1984, 302) reklamierten für sich, eine empirische Studie der marinen Isotopenüberlieferung durchgeführt zu haben, die wenig Raum für Zweifel zulasse, dass Variationen in der Geometrie der Erdumlaufbahn die hauptsächliche Ursache für die Aufeinanderfolge spätpleistozäner Eiszeiten sind.<sup>29</sup> Der Hauptbeitrag (bzw. das Hauptargument) ihrer „empirischen Evaluierung“ (evaluate empirically) der astronomischen Theorie (Milankovitch-Theorie) ist das Kohärenz-Spektrum (S. 301)<sup>30</sup>: Die Kohärenz zwischen den Orbital- und Isotopensignalen übersteige für alle Orbitalperioden den Wert von 0,9 (ihre Fig. 10) und sei somit statistisch hochsignifikant.<sup>31</sup>

Hier liegt ein folgschwerer Zirkelschluss vor. Der Vergleich der Isotopensignale mit den Orbitalsignalen ist ein Vergleich der *getunten*, ungeglätteten Isotopensignale mit den *theoretischen* Orbitalsignalen (Milankovitch-Zyklen). Wie oben ausführlich dargestellt, werden die ursprünglichen Datenreihen (Rohdatenreihen) zielgerichtet mehrfach interpretiert und stark verändert, um eine möglichst hohe Übereinstimmung („Gleichphasung“) mit den theoreti-

<sup>29</sup> Der Schlusssatz ihrer Konklusion (S. 302): „5. This empirical study of the marine isotopic record leaves little room for doubt that variations in the geometry of the Earth’s orbit are the main cause of the succession of late Pleistocene ice ages.“

<sup>30</sup> „Having developed a time scale (...), we are now in a position to evaluate the astronomical theory empirically. Our main contribution to this goal is the coherency spectrum (Fig. 10). As discussed above, coherencies at the four main periods of astronomical forcing – including the 100 KY eccentricity period – are 0.92 or above.“

<sup>31</sup> Der vorletzte Punkt ihrer Konklusion (S. 302): „4. At each of the main orbital periods that are resolvable in a record of this length (19 KY, 23 KY, 41 KY, 100 KY), coherencies between orbital and isotopic signals exceed 0.9 and are highly significant statistically. In narrow frequency bands centered on these four frequencies, therefore, at least 85 per cent of the isotopic variance is linearly related to orbital forcing.“

schen Orbitalsignalen zu erzwingen. Die Kohärenz mit Werten von  $>0,9$  zeugt lediglich von dem Güte-Maß des Tunings selbst. Die Daten sind auf theoretische Orbitalsignale angepasst worden, um Orbitalsignale nachzuweisen. Folglich ist die Konklusion von IMBRIE et al. (1984) falsch und irreleitend.

#### 4.6 Tuning-Fallbeispiel II: Konstruktion einer $\delta^{18}\text{O}$ -basierten Referenz-Zeitskala für das Plio-Pleistozän (LR04)

Die LR04-Zeitskala von LISIECKI & RAYMO (2005) ist in Bezug auf die SPECMAP-Zeitskala (siehe Abschnitt 4.5) eine Fort- und Neuentwicklung. Sie umfasst das gesamte Pliozän und Pleistozän und wurde im radiometrischen Altersrahmen primär auf den theoretischen Obliquitätszyklus getunt. Es handelt sich – wie bei der SPECMAP-Zeitreihe auch – um eine Feintuning einer bestehenden Zeitskala und nicht um eine eigenständige unabhängige Datierungsmethode.

##### **Daten**

- 57 ozeanische Bohrkerne (Atlantik, Pazifik, Indik) mit  $\delta^{18}\text{O}$ -Aufzeichnungen benthonischer Foraminiferen<sup>32</sup> unterschiedlicher stratigraphischer Reichweite<sup>33</sup>; in Summe 38.229  $\delta^{18}\text{O}$ -Messungen<sup>34</sup>.
- Im „Mittelungs“-Prozess erhalten Lokationen mit einer höheren (zeitlichen) Auflösung eine stärkere Gewichtung.
- Keines der  $\delta^{18}\text{O}$ -Profile hat am Ergebnis einen höheren Anteil als 30% mit Ausnahme der Daten des Kerns ODP 846 (SHACKLETON 1995), der für den Zeitraum  $<5$  Millionen [radiometrische] Jahre 40% beträgt.

##### **Konstruktion des $\delta^{18}\text{O}$ -Durchschnitts („Stack“)**

- Angleichung der 57  $\delta^{18}\text{O}$ -Profile (Oszillationsmuster) durch graphische Korrelation (automatisiertes, graphisches Korrelationsprogramm, vgl. LISIECKI & LISIECKI 2002); entspricht einer stratigraphischen Korrelation.
- Angleichung der 57  $\delta^{18}\text{O}$ -Profile auf initiale Zielkurven (sieben ausgewählte  $\delta^{18}\text{O}$ -Profile, bereits initial zeitkalibriert<sup>35</sup>) mit dem Ziel der Bildung von sieben kurzen Durchschnitten (short stacks).
- Zuweisung einer bestehenden Zeitskala (S95, SHACKLETON 1995) zu den sieben kurzen Durchschnitten und Verschweißung der einzelnen Abschnitte zu einem übergangsweisen

<sup>32</sup> Die Sauerstoffisotopenmessungen wurden hauptsächlich an *Uvigerina peregrina* und *Cibicidoides wuellerstorfi* vorgenommen.

<sup>33</sup> Nur fünf Sedimentkerne decken den gesamten stratigraphischen Untersuchungsbereich (Plio-Pleistozän) ab: DSDP 607, ODP 846, ODP 982, ODP 1148 (LISIECKI & RAYMO 2005, ihre Fig. 2).

<sup>34</sup> Die  $\delta^{18}\text{O}$ -Reihen der einzelnen Sedimentkerne waren bereits veröffentlicht oder sind LISIECKI & RAYMO überlassen worden.

<sup>35</sup> GeoB 1041 (0–0,15 M[r]a), ODP 1012 (0–0,6 M[r]a), ODP 927 (0–1,4 M[r]a), ODP 677 (0–2,0 M[r]a), ODP 849 (1,7–3,6 M[r]a), ODP 846 (2,7–5,3 M[r]a) und ODP 999 (3,3–5,3 M[r]a); nach LISIECKI & RAYMO (2005, 5).

Durchschnitt (transitional stack), der das ganze Intervall von 5,3 Millionen [radiometrische] Jahre umfasst.

- Durchführung von wenigen Adjustierungen am Altersmodell des übergangsweisen Durchschnitts.
- Durchführung finaler Angleichungen mit dem übergangsweisen Durchschnitt als Zielkurve und Bildung des finalen Durchschnitts (final LR04 stack).

### **Konstruktion der Zeitskala**

- Tuning auf ein simples, nicht-lineares Eisvolumen-Modell, welches maßgeblich durch die Funktion der [theoretischen] Insolationskurve (65°N, 21. Juni) mit Betonung auf die [theoretische] Obliquität gesteuert wird (nach La93, LASKAR et al. 1993).
- Abschnitt 0-22 k[r]a: <sup>14</sup>C-kalibriert (nach WAELBROECK et al. 2001).
- Abschnitt 22-120 k[r]a: Korrelation mit Sedimentkern MD95-2042 (SHACKELTON et al. 2000).
- Abschnitt 130 k[r]a: Termination II, U/Th-Alter von Korallen-Terrassen (BARD et al. 1990, STEIN et al. 1993).

### **Ergebnisse**

- Ein aus 57  $\delta^{18}\text{O}$ -Aufzeichnungen<sup>36</sup> bestehendes paläoozeanisches, globales (abstrahiertes) Durchschnitts-„Typen-Profil“ für das Plio-Pleistozän: LR04-Stack. Ihre erweiterte Sauerstoffisotopenstufen-Gliederung (MIS) des Plio-Pleistozäns ist der aktuelle Standard (GTS 2012).
- Eine mit [theoretischen] Milankovitch-Zyklen (primär Obliquitätszyklus) feingetunte Zeitskala für das Plio-Pleistozän: LR04-Zeitskala (Abb. 8 und Abb. 9). Die Kohärenz des LR04-Durchschnitts relativ zu den [theoretischen] Obliquitätskomponenten ist i. d. R. auf dem Konfidenz-Niveau von 95 % (und immer über 80 %). Eine Kohärenz zwischen dem LR04-Durchschnitt und den [theoretischen] Präzessionskomponenten ist i. d. R. nicht gegeben.

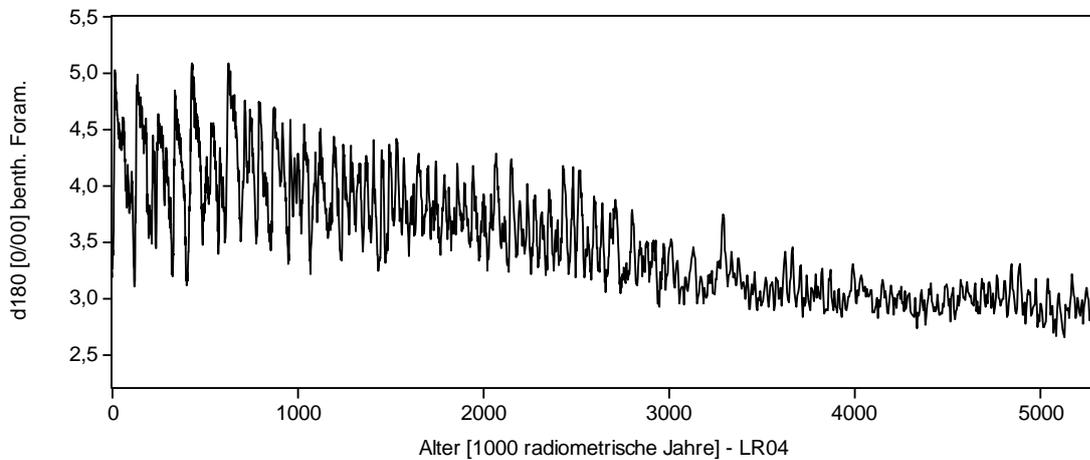
### **Fazit**

LISIECKI & RAYMO (2005) gehen *a priori* von der Existenz (bzw. der Überlieferung) von Langzeit-Variationen der Erdbahnparameter aus, deren [theoretisch] bekannten (errechneten) Periodizitäten sie für eine Feinskalierung (Feinsegmentierung) des Plio- und Pleistozäns nutzen. Nichtsdestotrotz können sie beinahe jedes Altersmodell auf ihren  $\delta^{18}\text{O}$ -Durchschnitt (LR04-Stack) anwenden<sup>37</sup>; hier kommt ihnen die strikte Trennung zwischen  $\delta^{18}\text{O}$ -Durchschnitt einerseits und Altersmodell andererseits zu Gute.

<sup>36</sup> Die  $\delta^{18}\text{O}$ -Aufzeichnungen werden als wichtige Indikatoren klimatischer Wechsel interpretiert: Die an den Foraminiferen gemessene Sauerstoffisotopenkonzentration wird als Funktion der Temperatur und des  $\delta^{18}\text{O}$  des Wassers betrachtet, in welchem sich die Foraminiferen bildeten, das  $\delta^{18}\text{O}$  des Meerwassers wiederum als eine Funktion des globalen Eisvolumens und der Wassersalinität (nach LISIECKI & RAYMO 2005, 2).

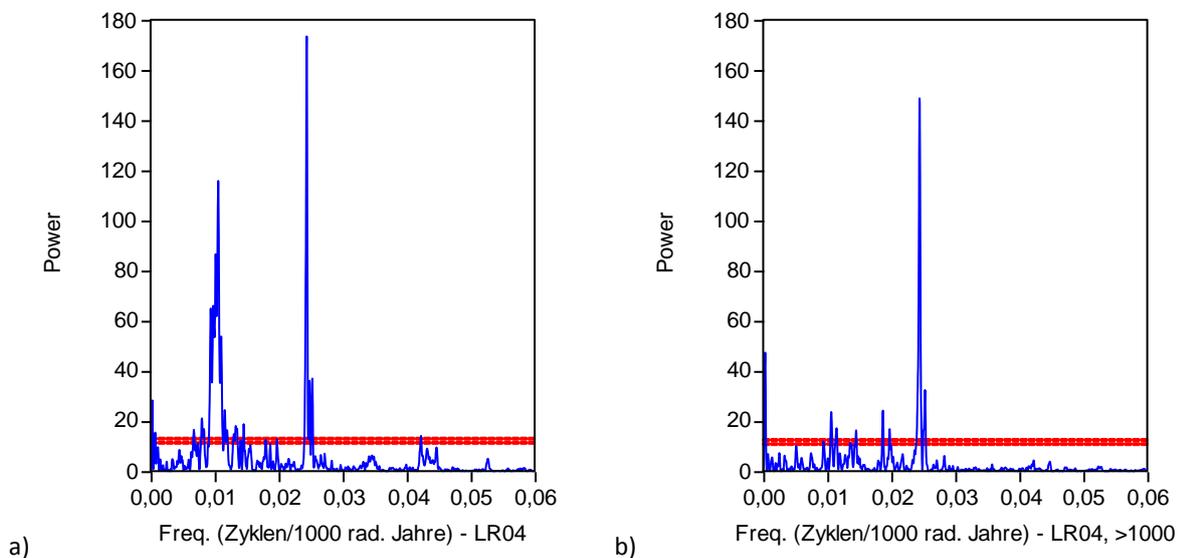
<sup>37</sup> „However, almost any age model could be applied to the LR04 stack“ (LISIECKI & RAYMO 2005, 6).

Die hohe Übereinstimmung („Gleichphasung“) des LR04-Durchschnitts relativ zu den [theoretischen] Obliquitätskomponenten ist dem Tuning selbst geschuldet, ein Maß für die Tuning-Güte.



**Abb. 8** LR04-Zeitreihe (Plio-Pleistozän).

Von LISIECKI & RAYMO (2005) primär auf den theoretischen Obliquitätszyklus getunte Zeitreihe auf Basis eines Durchschnitts aus 57  $\delta^{18}\text{O}$ -Reihen unterschiedlicher (stratigraphischer) Reichweite (vgl. Abb. 9, siehe Textteil); die Sauerstoffisotopenmessungen erfolgten an benthonischen Foraminiferen. Die  $\delta^{18}\text{O}$ -Konzentrationen (Ordinate) werden üblicherweise invers dargestellt. Liniendarstellung,  $n = 2.115$ ; Datei: LR04stack.txt.



**Abb. 9** Lomb-Periodogramme der LR04-Zeitreihe.

a) Gesamte Zeitreihe (0-5.320 k[r]a). Peaks bei 0,0106/0,0244/0,0423 Zyklen/k[r]a, entsprechen Perioden von 95/41/24 k[r]a. b) Ausschnitt (1.000-5.320 k[r]a). Peaks bei 0,0106/0,0187/0,0244 Zyklen/k[r]a, entsprechen Perioden von 94/54/41 k[r]a. – Die primär auf den theoretischen Obliquitätszyklus (41 k[a]) getunte Zeitreihe zeigt in beiden Varianzspektren einen entsprechenden signifikanten und sehr dominanten Peak (41 k[r]a); das Varianzspektrum der gesamten Reihe wird zusätzlich von Perioden des theoretischen Exzentrizitätszyklus (~100 k[a]) und untergeordnet des theoretischen Präzessionszyklus (24 k[r]a) dominiert, die verstärkt in dem zeitkalibrierten Bereich von 0-1.000 k[r]a auftreten. Datei: LR04stack.txt; rote Linien: Signifikanz-Level 95/99% ( $\alpha = 0,05/0,01$ ).

## 5 Beschreibung, Analyse und Diskussion ausgewählter zyκλοstratigraphischer Arbeiten

Die vorgenommene Auswahl repräsentiert beispielhaft einen qualitativen Ausschnitt zyκλοstratigraphischer (und astrochronologischer) Arbeiten. Folgende Kriterien fanden Berücksichtigung:

- Historische Reichweite; Publikationszeitraum primär ab 1976.
- Stratigraphische Reichweite; Sedimentfolgen vom Quartär bis zum Devon.
- Globale Reichweite; auch Sedimentfolgen in Deutschland und einigen europäischen Ländern.
- Reichweite hinsichtlich unterschiedlichster Ablagerungsräume.
- „Mediale“ Reichweite; bedeutende Arbeiten und weniger bekannte, auch Dissertationen.
- Methodische Vielfalt.
- Datenverfügbarkeit.

Die Arbeiten sind nach ihrem Erscheinungsjahr geordnet. Die Bearbeitung der Fallbeispiele folgt einem gleichförmigen Aufbau, teilweise mit tabellarischem Charakter. Unter *Systematik* wird die methodische Vorgehensweise der Autoren mit ein oder zwei Stichworten zusammengefasst; sie wird zuvor im Analyse- und Diskussionsteil beschrieben.

### 5.1 GILBERTS Versuch einer sedimentären Messung geologischer Zeit

#### **Titel**

GILBERT (1895): Sedimentary measurement of geological time. [*Sedimentäre Messung geologischer Zeit.*]

#### **Lithostratigraphie, Untersuchungsgebiet**

Benton-, Niobrara- und Pierre-Gruppe; Colorado (USA).

#### **Stratigraphisches Alter**

Oberkreide.

#### **Beschreibung und Relevanz**

Ziel und Vorgehensweise fasste GILBERT im ersten Satz seines Artikels zusammen: „Es ist die Absicht dieser Arbeit, in Colorado beobachtete, bestimmte regelmäßige Wechsellagerungen zu beschreiben, diese mit astronomischen Zyklen bekannter Dauer zu korrelieren und über diese Korrelation eine Abschätzung in Jahren eines Teil der kretazischen Zeit abzuleiten.“<sup>38</sup>

---

<sup>38</sup> GILBERT (1895, 121): „It is the purpose of this paper to describe certain regular alternations of strata observed in Colorado, to correlate these with an astronomic cycle of known period, and to deduce from this correlation an estimate in years of a portion of Cretaceous time.“

Es handelt sich um die etwa 3.900 Fuß (ca. 1.190 m) mächtige, kretazische Abfolge der Benton-, Niobrara- und Pierre-Gruppe, die hauptsächlich aus Tonschiefern besteht. GILBERTS Interesse galt vier lithologisch auffälligen, bis zu 15 m mächtigen Einheiten mit karbonatischen Einschaltungen, die er als rhythmisch beschrieb.

### **Methodik**

Wechsellagerungen aus Kalkstein und Tonschiefer bzw. aus kalkärmeren und kalkreicheren Tonschiefern werden als Grundeinheiten definiert; die Mächtigkeit einer Wechsellagerung (Rhythmit) beträgt durchschnittlich 18 Inches (etwa 46 cm) (Tab. 2).

Sodann wird die Bildungsdauer einer Grundeinheit bestimmt: Es erfolgt die Zuweisung, dass ein Rhythmit der Dauer eines [theoretischen] Präzessionszyklus<sup>39</sup> entspricht, also während einer Dauer von etwa 21.000 [astronomischen] Jahren gebildet wurde. Diese Eichung erlaubt nun die Berechnung der durchschnittlichen Sedimentationsrate.

Karbonatische Abschnitte (als rhythmisch beschrieben)	Dicke Kalkstein [cm]	Dicke Tonschiefer [cm]	Ø Dicke 1 Rhythmit [cm]	Anzahl Rhythmite gesamt	Profil- Meter gesamt	Σ Profil- Meter
Basis der Benton-Gruppe (Kalk/Tonschiefer-Wechsellagerung)	dm-Bereich	30-75	46	15	k. A.	6,9
Basis der Niobrara-Gruppe (Kalk/Tonschiefer-Wechsellagerung)	30-45	2-10	46	k.A.	15,2	15,2
Unteres Drittel der Niobrara-Gruppe (karbonatische Tonschiefer mit wechselndem Kalkgehalt)	k. A.	k. A.	75-90	k. A.	9,1	9,1
Top der Niobrara-Gruppe (Tonschiefer mit karbonatischen Lagen)	k. A.	k. A.	k. A.	wenige	k. A.	2,0
(Summe)						33,3

**Tab. 2** Wechselfolgen in der Benton- und Niobrara-Gruppe, Colorado (USA).

Als Rhythmite interpretierte Wechsellagerungen. Durch Zuweisung der Dauer eines theoretischen Präzessionszyklus zu einem Rhythmit errechnete GILBERT (1895) – unter Zugrundelegung weitere Annahmen und Zwischenschritte – eine fiktive Dauer der kretazischen Periode (Ergebnis und Diskussion siehe Textteil). Letzte Spalte Ergänzungen des Verfassers; errechnete bzw. geschätzte Summen. Legende: k. A. = keine Angabe.

Über einen weiteren Zwischenschritt erfolgt die Bestimmung der Sedimentationsrate für reinen Tonschiefer, dem Hauptbestandteil der gesamten kretazischen Abfolge: Ausgehend von der Überlegung, dass die Sedimentationsrate von Kalkstein [Kalkschlamm] niedriger ist als von Tonschiefer [Tonschlamm], wird auf Basis der durchschnittlichen Sedimentationsrate von 2,7 Fuß (80-85 cm) pro [theoretischen] Präzessionszyklus für einen karbonatischen Tonschiefer (Tab. 2, Spalte 4, 3. Eintrag) die Sedimentationsrate für einen (reinen) Tonschiefer

<sup>39</sup> Von den zur Auswahl stehenden [teilweise theoretischen] astronomischen Zyklen, Jahr (Erdumlauf), [theoretische] Präzession und Exzentrizität, entscheidet sich GILBERT (S. 123f) für den [theoretischen] Präzessionszyklus; hierüber herrsche auch unter zahlreichen anderen Autoren die substantielle Übereinstimmung (substantial agreement), dass die Verteilung der Klimate von diesem Zyklus wesentlich beeinflusst werden kann (may be materially affected). Der 1-Jahreszyklus scheidet aus, weil das Jahr für die Akkumulation des Sediments zu kurz sei. Der Exzentrizitätszyklus dagegen zeige zu starke Schwankungsbreiten, die mit den „relativ einheitlichen Ablagerungszyklen“ nicht korreliert werden könnten.

auf 4 Fuß (ca. 1,2 m) pro Präzessionszyklus geschätzt. Mit diesem (letzten) Wert wird schließlich die Dauer der gesamten Folge berechnet.

### ***Ergebnisse und Schlussfolgerungen des Autors***

GILBERT (1895, 127) errechnet für die etwa 3.900 Fuß (ca. 1.190 m) mächtige, kretazische Abfolge der Benton-, Niobrara- und Pierre-Gruppe eine Dauer von etwa 20 Millionen [astronomischen] Jahren.<sup>40</sup> Sich einer Unsicherheit bewusst, wählt er einen Sicherheitsfaktor von 2 bzw. 1 durch 2 (entspricht einer Spanne von 10-40 Millionen [astronomischen] Jahren) und glaubt damit alle Unwägbarkeiten abgedeckt zu haben: „(...) the true period may be either twice or only one-half the estimated period of twenty million years.“

### ***Diskussion***

GILBERT legt seine Annahmen und Folgerungen deutlich und nachvollziehbar dar.

Die Kalkulation ist geradlinig; die mehrstufige Extrapolation, besonders in dieser Dimension, allerdings ist unzulässig: Die karbonatischen Abschnitte, hauptsächlich Kalkstein/Tonschiefer-Wechselagerungen, haben an der gesamten Sedimentfolge lediglich einen Anteil von etwa 3 % (~33 m; vgl. Tab. 2, Spalte 7). Die Anzahl der ausgewiesenen Rhythmite, in einer Abfolge nur 15, ist sehr gering. Die diesen Rhythmiten zugewiesenen Eigenschaften (hinsichtlich Genese und Dauer) werden, adjustiert um den Wegfall der karbonatischen Komponente, auf die restlichen 97 % (rund 1.150 m) der Sedimentfolge übertragen, die als Tonschiefer ausgebildet sind und keine Rhythmite aufweisen.<sup>41</sup>

Werden die Annahmen betrachtet, ist festzustellen, dass GILBERT einen Nachweis für einen sedimentären Zyklus nicht erbringt; er weist auch nicht das Vorliegen eines theoretischen Präzessionszyklus nach, vielmehr geht er von seiner Existenz aus.<sup>42</sup> Methodisch korreliert GILBERT (einfach) die als zyklisch interpretierten Ablagerungen (Rhythmite) mit dem theoretischen Präzessionszyklus; dadurch weist er den Rhythmiten ihre Periodendauer zu.<sup>43</sup> Die „sedimentäre Messung“ basiert allerdings auf nicht verifizierte (spekulative) Annahmen; folglich ist das Ergebnis fiktiv.

GILBERTS Schätzung der Zeitdauer der Oberkreide von 20 (-10/+20) Millionen [astronomischen] Jahren entsprach in der Größenordnung der Erwartung eines Großteils der damaligen geologischen Gemeinschaft (vgl. LYELL 1867-68; MATTHEW 1914; KOTULLA 2014, 2-32 und 2-35).<sup>44</sup> Ein Resultat um einen Faktor 21.000 geringer (Kalibrierung anhand des Erdumlaufs, im

<sup>40</sup> 3.900 Fuß/4 Fuß x 21.000 [astronomische] Jahre = 20.475.000 [astronomische] Jahre.

<sup>41</sup> Sedimentologische Aspekte werden hier nicht diskutiert.

<sup>42</sup> GILBERT unternimmt nicht den Versuch, den Präzessionszyklus nachzuweisen; die Fähigkeit des [theoretischen] Präzessionszyklus, klimatische Oszillationen zu erzeugen, sei bereits von anderen Autoren behandelt worden.

<sup>43</sup> GILBERT (1895, 127): „The cycle of deposition is correlated with the precession-perihelion cycle (...)“.

<sup>44</sup> STRASSER et al. (2006, 76) konstatieren, dass GILBERT die Dauer dieses kretazischen Abschnitts genau (accurately) bestimmt hätte – noch vor Erfindung (invention) der radiometrischen Datierung. Werden die ehemals als Benton-, Niobrara- und Pierre-Gruppe bezeichneten Sediment-Einheiten vollumfänglich der Oberkreide (ca. 34 Millionen [radiometrische] Jahre, GTS2012) zugeordnet, scheint dies im Rahmen GILBERTS großzügiger Unsicherheitsgrenzen zuzutreffen, insofern – neben anderen Voraussetzungen – [theoretische]

Ergebnis etwa 1.000 [astronomische] Jahre) oder um einen Faktor 5 höher (Kalibrierung anhand der theoretischen Exzentrizität, im Ergebnis etwa 100 Millionen [astronomische] Jahre), hätte nicht in den Vorstellungsrahmen gepasst.

### **Systematik**

Zuweisung.

### **Fazit**

GILBERTS astronomisch-kalibrierte „sedimentäre Messung geologischer Zeit“ ist eine zielgerichtete Schätzung der Bildungsdauer einer kretazischen Sedimentfolge im Rahmen uniformitaristischer Langzeit-Vorstellung. Er suggerierte, dass solch eine Messung (Berechnung) einfach durchführbar und – eine Unsicherheit berücksichtigend – auch valide ist. Seine ermittelte Zeitspanne allerdings ist *keine* wahre Zeitspanne („true period“) – wie er versucht, glaubhaft zu machen –, sondern reine Fiktion.

## **5.2 Die Green-River-Formation: Versuch einer unabhängigen Verifizierung radiometrischer Altersbestimmung**

### **Titel**

BRADLEY (1929): The Varves and Climate of the Green River Epoch. [*Die Warven und das Klima der Green-River-Epoche*].

### **Lithostratigraphie, Untersuchungsgebiet**

Green-River-Formation, zwei (intermontane) Becken in Colorado/Utah und Wyoming (USA).

### **Stratigraphisches Alter**

Mittleres Eozän.

### **Beschreibung und Relevanz**

BRADLEYS Ansinnen war, die sich etablierende radiometrische Methode, die inzwischen zur absoluten Bestimmung von Intervallen der geologischen Zeit verwendet wurde, unabhängig – auf Basis von Zyklen bekannten Periodendauer – zu verifizieren (S. 87). Für dieses Vorhaben schien ihm die Green-River-Formation für eine Abschätzung der Dauer des Eozäns geeignet.

---

astronomische und radiometrische Jahre gleichgesetzt werden könnten und Realjahre repräsentieren würden. Zu dieser vermeintlichen „Übereinstimmung“ stellt sich vielmehr die Frage, warum die radiometrischen Alterswerte mit den zuvor dargelegten Zeitvorstellungen der historischen Geologie (für die fossile Überlieferung, hauptsächlich Phanerozoikum) scheinbar, zumindest grob „übereinstimmen“ (vgl. LVELL 1867-68; KOTULLA 2014, 2-32).

Die Green-River-Formation<sup>45</sup> hat eine durchschnittliche Mächtigkeit von 2.000 Fuß (610 m) und erstreckt sich über ein Areal von etwa 25.000 Quadratmeilen (ca. 65.000 km<sup>2</sup>). Die Beckenablagerungen setzen sich hauptsächlich aus Schichten von Mergelstein, Ölschiefer<sup>46</sup> und feinkörnigem Sandstein zusammen.

Die alternierende Ausbildung einzelner Abschnitte der Formation interpretiert BRADLEY als regelmäßig rhythmisch (zyklisch). Er unterscheidet primär zwei Typen:

- (1) Die feinlamierten Folgen im Submillimeter-Bereich, die in vier Varietäten auftreten. Sie bestehen hauptsächlich aus einer Wechselfolge Organik-reicherer, mergeliger und Organik-ärmerer, karbonatisch-feinsandiger Laminen, die zu einem Paar (Couplet) zusammengefasst und als Warve<sup>47</sup> angesprochen (gedeutet) werden.
- (2) Darüber hinaus werden Wechselfolgen von Ölschiefer und Mergelstein im Dezimeter-/Meter-Bereich beschrieben.

### Methodik

Über die Zuweisung einer jahreszeitlichen Bildung (1 Lagencouplet = 1 Jahr) wird die Sedimentationsrate berechnet; aufgrund der unterschiedlichen „Warven“-Dicken der Gesteine ergeben sich rechnerisch auch unterschiedliche Raten (ausgewiesen als Akkumulationszeiten für ein Fuß Sediment). Als Zwischenergebnis wird eine gewichtete durchschnittliche „Warven“-Dicke von 0,18 mm und eine durchschnittliche Sedimentationsrate für 1 Fuß Sediment pro 2.200 [„Warven“-] Jahren ausgewiesen (Tab. 3).

Typ Warvengestein	Vermessene Warven [Anzahl]	Dicken-spanne Warve [mm]	Ø Dicke Warve [mm]	Akkumulationszeit für 1 Fuß [Jahre]	Σ Profil [m]	rechnerische Akkumulationszeit für 1 Fuß [Jahre]
Kalkige Sandsteine	32	0,600-9,800	1,160	250	0,04	263
Mergelsteine	268	0,014-0,370	0,167	2000	0,04	1825
Ölschiefer, mäßiger Gehalt	18	0,030-0,014	0,065	4700	0,00	4689
Ölschiefer, hoher Gehalt	143	0,014-0,153	0,037	8200	0,01	8238
Gewichteter Durchschnitt			0,180	2200		1693
(Summe)	461				0,09	

**Tab. 3** Typen und Dicken der „Warven“ der Green-River-Formation.

BRADLEY interpretiert die feinlamierten Sedimente als Warven; einen Nachweis einer Jahresschichtung (Warvierung) erbringt er nicht. Die Sedimentationsrate (bzw. Akkumulationszeit) errechnet sich über die Zuweisung einer jahreszeitlichen Bildung (1 Lagencouplet = 1 Jahr). Insgesamt sind nur 9 cm Gestein vermessen

<sup>45</sup> Die Green-River-Formation ist auch als Konservatlagerstätte bekannt; insbesondere die ausgestorbene Heringsgattung *Knightia* ist in zwei Lageneinheiten ausgesprochen massenhaft vertreten.

<sup>46</sup> Nach dem Scientific Investigations Report 2005-5924 des USGS enthält die Green-River-Formation mit geschätzten 213 Milliarden Tonnen weltweit die größten bekannten Vorkommen an Ölschiefer (DYNI 2006, 37).

<sup>47</sup> BRADLEY (1929, 87) verweist bezüglich der Definition und Etymologie des Begriffs Warve auf ANTEVS (1925), der wiederum DE GEER (1912, 253) zitiert: „(...) as an international term for the distinctly marked *annual deposit* of a sediment regardless of its origin.“ – DE GEER allerdings hat eine jährliche (saisonale) Bildung („jährliche Ablagerung“) der von ihm als Warven angesprochenen Sedimente nicht nachgewiesen (siehe KOTULLA 2014, 3-10).

worden (Spalte 6). Nach BRADLEY (1895), u. a. seine Tabelle auf S. 99; Spalten 6 und 7 sind Ergänzungen des Verfassers.

Für die als fluviatil interpretierten Ablagerungen der über- bzw. unterlagernden übrigen eozänen Formationen (Wasatch, Bridger und Uinta) nimmt BRADLEY eine leicht geringere Sedimentationsrate von durchschnittlich 1 Fuß Sediment pro 3.000 [„Warven“-] Jahre an. Aus den vermessenen Mächtigkeiten aller vier Formationen und den festgelegten Sedimentationsraten wird schließlich die Dauer des Eozäns geschätzt.

Für die größeren „Zyklen“ aus alternierenden Schichtkörpern aus Ölschiefer (etwa 0,6 bis 3,0 Fuß dick) und Mergelstein (etwa 6 Fuß dick) werden über die oben durchgeführte „Warven“-Kalibrierung Perioden errechnet und in Beziehung zum theoretischen Präzessionszyklus gesetzt.

### **Ergebnisse und Schlussfolgerungen des Autors**

BRADLEY kalkuliert die Dauer des Eozäns zu  $22,9 \pm 7,9$  Millionen [Warven-] Jahre (Tab. 4). Seine Übereinstimmung mit BARRELL (1917), im Mittel 23 Millionen [radiometrische] Jahre<sup>48</sup>, ist bemerkenswert. BRADLEY relativiert sein übereinstimmendes Ergebnis, „zweifellos ein purer Zufall“, unter Verweis auf die relativ große Unsicherheit; entscheidend aber sei die Übereinstimmung in der Größenordnung.<sup>49</sup> Damit hat BRADLEY (aus seiner Sicht) sein Ziel einer unabhängigen, verlässlichen Testschätzung („reliable check estimates“, S. 87) der radiometrischen begründeten Alterswerte des Eozäns erfüllt.

Eozäne Formationen	Ca.-Mächtigkeit [Fuß]	Ø Akkumulationsrate, für 1 Fuß [Warven-Jahre]	Zeitintervall [Millionen [W/r] Jahre]			Unsicherheit
			Minimum	Kalkuliert	Maximum	
Green River	2600	2500 (?)	5,0	6,5	8,0	± 1,5 Mio.
Bridger und Uinta	1900	3000	2,8	5,7	8,5	± 50%
Summe	4500		13,0	22,9	32,8	
Barrells (1917) Schätzung der Dauer des Eozäns auf Basis radioaktiver Minerale (Mittelwert durch Bradley)			20	23	26	

**Tab. 4** Primär „Warven“-kalibrierte Schätzung der Dauer des Eozäns.

BRADLEYS Akkumulationsraten (bzw. Sedimentationsraten) basieren auf einer „Warven“-Kalibrierung. Bemerkenswert ist die Übereinstimmung seiner Schätzung der Dauer des Eozäns, (kalkuliert) 22,9 Millionen [Warven-] Jahre, mit BARRELLS (1917) Schätzung, im Mittel 23 Millionen [radiometrische] Jahre, auf Basis radioaktiver Minerale (Diskussion siehe Textteil). Zu Spalte 3: Für die Green-River-Formation gibt BRADLEY eine durchschnittliche Sedimentationsrate von 1 Fuß pro 2.200 [„Warven“-] Jahre an, rechnerisch müssten es aber 2.500 [„Warven“-] Jahre sein. Legende: W = [„Warven“-]Jahre, r = [radiometrische] Jahre.

<sup>48</sup> BRADLEY nennt für das Eozän als radiometrische Altersfixpunkte eine Bestimmung im Grenzbereich Kreide/Eozän (60 Millionen [radiometrische] Jahre, nach HOLMES 1927) sowie eine Bestimmung im Grenzbereich Eozän/Oligozän (31 Millionen [radiometrische] Jahre, nach BARRELL 1917). Weiter führt er aus, dass BARRELL zusätzlich aufgrund stratigraphischer Evidenz auf eine Dauer des Eozäns von 20 bis 26 Millionen [radiometrischen] Jahren schloss.

<sup>49</sup> BRADLEY (1929, 110): „Die sehr starke Übereinstimmung zwischen dem Durchschnitt der Schätzungen des Autors, ein wenig niedriger als 23 Millionen Jahre, und dem Durchschnitt der Schätzungen von BARRELL, 23 Millionen Jahre, ist zweifellos ein purer Zufall; denn die erwiesenen Fehler in der Abschätzmethode des Autors sind sicherlich in der Größenordnung von einigen Millionen Jahren. Gleichwohl scheint die Schätzung des Autors, die vollkommen unabhängig von einer solchen basierend auf radioaktive Minerale ist, eine interessante, aber offensichtlich grobe Prüfung zu liefern.“

Als (Neben-) Ergebnis weist BRADLEY an vier Lokalitäten insgesamt 16 rhythmisch alternierende Schichtkörper von Ölschiefer und Mergelstein aus, deren Warven-kalibriertes Alter, im Mittel 21.630 [Warven-] Jahre (Tab. 5), passend in der Größenordnung des theoretischen Präzessionszyklus von etwa 21.000 [astronomische] Jahre liegt (hinsichtlich Dauer und Methode verweist BRADLEY auf GILBERT 1895, siehe Abschnitt 5.1).

Ölschiefer/Mergelstein Wechsellagerungen (Lokalitäten, alle Colorado)	Anzahl Wechsel-lagerungen (Intervalle)	Dicke 1 Wechsel-lagerung, Spanne [Fuß]	errechnete Dauer der Intervalle, Spanne [k[W]a]	$\Sigma$ Profil [Fuß]	$\emptyset$ Sedimentationsrate [mm/[W]a]
Parachute Creek	4	8,3-10,8	22,8-27,0	37,8	
Clear Creek	6	5,7-8,9	16,5-25,4	44,9	
Cathedral Creek (untere Gruppe)	3	7,4-9,2	18,6-21,6	24,2	
Cathedral Creek (obere Gruppe)	3	6,5-8,2	16,1-21,0	22,5	
Durchschnitt			21,630		
(Summe)	16			129,4	0,11

**Tab. 5** Sedimentfolgen, die einen Präzessions-Zyklus andeuten (Green-River-Formation).

Nach BRADLEY (1929): „Gruppen von Schichten, die einen Präzessions-Zyklus andeuten.“ BRADLEY weist an vier Lokalitäten insgesamt (nur) 16 rhythmisch alternierende Schichtkörper von Ölschiefer und Mergelstein aus, deren „Warven“-kalibriertes Alter, im Mittel 21.630 [Warven-] Jahre, in der Größenordnung des theoretischen Präzessionszyklus (etwa 21.000 [astronomische] Jahre) liegt. BRADLEY nahm folgende Sedimentationsraten an (vgl. Tab. 3): Ölschiefer, mit steigendem Öl-Ertrag: 1 Fuß pro 2.000/4.700/8.200 [Warven-] Jahre; Mergelstein: 1 Fuß pro 2.000 [Warven-] Jahre. Der errechnete Durchschnitt von 0,11 mm/[W]a (Spalte 6) entspricht 1 Fuß pro 2.771 [Warven-] Jahre. Legende: W = [„Warven“-]Jahre.

## Diskussion

BRADLEY reklamiert für sich, über die von ihm vorgenommene „Warven“-Kalibrierung eine unabhängige Schätzung der Dauer des Eozäns von annähernd 23 Millionen [„Warven“-] Jahren vorgenommen zu haben, die mit der radiometrischen Altersbestimmung in Einklang steht.

Die Validität der Zeit-Konstruktion steht oder fällt mit dem Nachweis der Warvierung. BRADLEY hat den Versuch unternommen, über einen Analogieschluss zu „Warven“ in heutigen Seegewässern (u. a. Züricher See, Genfer See)<sup>50</sup> sowie einer (Prognose-) Kalkulation der zu erwartenden Dicken der jährlichen Laminae des fossilen Green-River-Sees auf Basis rezenter Flussfeststoffe (Sedimenteinträge) seine Annahme der Warvierung zu prüfen („is tested“). Mit diesen spekulativen Annahmen hat BRADLEY aber nicht den Nachweis einer Warvierung erbracht (vgl. KOTULLA 2014, 3-01 ff).<sup>51</sup>

Des Weiteren auffällig sind die Übertragungen und Extrapolationen, die in diesem Umfang unzulässig sind. Die in der Summe an nur 9 Zentimetern Profil (461 „Warven“) „Warven“-kalibrierten Sedimentationsraten (vgl. Tab. 3) werden über die gesamte, hauptsächlich nicht feinelaminierte Abfolge von 2.600 Fuß (Green-River-Formation) extrapoliert und leicht

<sup>50</sup> Siehe LAMBERT & HSÜ (1979): Non-annual cycles of varve-like sedimentation in Walensee, Switzerland.

<sup>51</sup> Alternative Deutungen werden hier nicht behandelt.

variiert auf fluviatile Ablagerungen von weiteren 5.500 Fuß (1.676 m) übertragen; die Reichweite der Extrapolation beträgt etwa das 27.000-Fache.

Die Arbeit von BRADLEY reiht sich ein in zahlreiche Versuche, die radiometrischen Alterswerte zumindest in ihrer Größenordnung durch unabhängige Methoden verifizieren zu wollen. Ohne den Nachweis einer Warvierung sind BRADLEYS Ergebnisse fiktiv. Eine Verifizierung der radiometrischen Methode ist nicht gegeben (vgl. KOTULLA 2014, 2-36 und 4-21f), auch nicht eine Verifizierung des theoretischen Präzessionszyklus.<sup>52</sup> Bei der Ermittlung der Zeitspannen der „Gruppen von Schichten, die einen Präzessionszyklus andeuten“ (Tab. 5) handelt es sich methodisch einfach um eine Zuweisung.

Bemerkenswert sind die Folgen: Während BRADLEY die radiometrischen Alterswerte für das Eozän der Größenordnung nach verifizieren wollte, werten DUFF et al. (1967) die [vermeintliche] Übereinstimmung der Ergebnisse als eine Bestätigung der Gültigkeit der von BRADLEY angewendeten Methode und folglich dem Vorliegen einer Warvierung und eines Präzessionszyklus.<sup>53</sup> Das allerdings ist ein Zirkelschluss.

### **Systematik**

Zuweisung (bezogen auf die astronomische Kalibrierung).

### **Fazit**

Bei BRADLEYS groben Check (rough check) der radiometrischen Methode scheint es sich um eine zielgerichtete Konstruktion zu handeln. Das „Ergebnis“ lässt den Eindruck entstehen, dass der Langzeit-Entwurf der geologischen Zeit in seiner Größenordnung durch mindestens zwei unabhängige Methoden seine Bestätigung findet. Das ist aber nicht der Fall.

## **5.3 Die „Pacemaker“-Studie: Bestätigung der „Astronomischen Theorie der Eiszeiten“?**

### **Titel**

HAYS et al. (1976): Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages. [*Variationen in der Erdumlaufbahn: Schrittmacher der Eiszeiten*].

### **Lithostratigraphie, Untersuchungsgebiet**

Nicht angewendet (pelagische Tiefseesedimente); zwei kurze Tiefseebohrkerne aus dem Grenzbereich Indischer Ozean/Antarktischer Ozean.

### **Stratigraphisches Alter**

<sup>52</sup> Neuere Arbeiten werden nicht berücksichtigt (z. B. MALCHUS et al. 2008, MEYERS 2008), da primär die Situation in den 1920er-Jahren im Vordergrund steht.

<sup>53</sup> DUFF et al. (1967, 67): „Es ist eine bemerkenswerte Bestätigung der Methode [BRADLEYS Methode, M. K.], insofern als dass radiometrische Bestimmungen eine Dauer des Eozäns von 20 Millionen Jahren anzeigen; BRADLEYS (1929) Schätzung war 23 Millionen Jahre.“

(Holozän), oberes Pleistozän.

### **Beschreibung und Relevanz**

Das Ziel von HAYS et al. war, die Orbital-Theorie (hypothesis) einem geologischen (Nachweis-) Test zu unterziehen. Bisherige Arbeiten<sup>54</sup> hätten eine starke andeutende Evidenz (strong suggestive evidence) dafür geliefert, dass orbitale Wechsel klimatische Wechsel induziert hätten; als zugrundeliegende kontrollierende Variablen gelten der [theoretische] Obliquitätszyklus mit einer Periode von etwa 41.000 [astronomischen] Jahren und der [theoretische] Präzessionszyklus mit einer Periode von etwa 21.000 [astronomischen] Jahren. Für den Test sollten klimatisch sensitive Parameter aus zwei Tiefseebohrkernen gesammelt und ausgewertet werden.

Bohrkern	Koordinaten	Region	Wassertiefe [m]	Kernlänge [cm]	Probenintervall [cm]	Variablen	Ca.-Anzahl Proben pro Variable
RC11-120	43°S 79°E	Grenzbereich Indischer/ Antarktischer Ozean	3135	954	10	3	95
E49-18	46°S 90°E		3256	1459	10	3	146

**Tab. 6** Zahlen und Fakten zu den Bohrkernen der „Pacemaker“-Studie. Zusammengestellt nach HAYS et al. (1976).

### **Methodik I: Untersuchungsgegenstand und Messreihen**

Reihenuntersuchungen an Sedimenten zweier (flacher) Tiefseekerne (aus einer Auswahl von mehreren Hundert Kernen<sup>55</sup>) im 10-cm-Intervall<sup>56</sup>: RC11-120, E49-18.

- Geochemische Analyse:  $\delta^{18}\text{O}$  (an planktonischen Foraminiferen).
- Oberflächentemperatur:  $T_s$  (Schätzung anhand einer statistischen Transferfunktion; Basis: Radiolarien-Vergesellschaftungen).
- Fossilkonzentration: *Cycladophora davisiana* (% relativ zur Radiolarien-Gesamtheit).

Datenverfügbarkeit (öffentlich, IMBRIE et al. 1984 und MARTINSON et al. 1987): RC11-120:  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $T_s$ , *C. davisiana*,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\text{CaCO}_3$ ; E49-18:  $\text{CaCO}_3$ . Die Datenreihen sind nicht mit denen von HAYS et al. identisch, sie beinhalten sie aber; durch Nachbeprobung sind die Probenintervalle – mit Ausnahme von  $\text{CaCO}_3$  – auf 5 cm verkleinert und damit die Anzahl der Wertepaare verdoppelt worden. Für einige Variablen sind keine Daten (öffentlich) verfügbar, zusätzlich sind einige neue Datenreihen hinzugekommen. Datenverwendung durch den Verfasser (s. u.).

### **Methodik II: Alters-zu-Tiefen-Beziehung, Konstruktion der Zeitreihen, Tuning**

Stratigraphisch deckt Kern RC11-120 die Sauerstoffisotopenstufen (MIS) 1 bis 9 ab, Kern E49-19 dagegen die Sauerstoffisotopenstufen 5 bis 13; eine stratigraphische Korrelation der bei-

<sup>54</sup> Es werden genannt: BROECKER (1966), „Changes in climate occur in response to periodic variations in the earth's tilt and precession“; VAN DEN HEUVEL (1966); KEMP & EGER (1967); BROECKER et al. (1968); MESOLELLA et al. (1969); BROECKER & VAN DONK (1970); IMBIRE & KIPP (1971); KUKLA (1972); CHAPPELL (1973).

<sup>55</sup> Unverständlich ist, dass aus der Fülle der Sedimentkerne E49-18 ausgewählt wurde, obwohl die ersten 400 cm nicht oder nur bedingt verwertbar sind: „Stratigraphisch“ fehlen die ersten Sauerstoffisotopenstufen (MIS), das sollen „zeitlich“ etwa 150 cm ausmachen; darüber hinaus ist der Kern im Bereich 300-400 cm mechanisch (bohrkerngewinn technisch) gestreckt.

<sup>56</sup> Entspricht zeitkalibriert etwa einem Intervall von 3.000 [radiometrischen] Jahren.

den Kerne erfolgt(e) visuell für die Stufen 6 bis 9 anhand des Sauerstoffisotopenprofils ( $\delta^{18}\text{O}$ ). Für die initialen SIMPLEX-Chronologien werden zwei radiometrische Ankerpunkte gewählt (Stufengrenzen 5/6 und 11/12); für die jeweiligen Tiefenabschnitte lässt sich damit für jeden Kern eine Sedimentationsrate ermitteln, die auf den gesamten Kern extrapoliert wird (Tab. 7).

Bohrkern	Tiefe [cm]	Radiometr. Ankerpunkte		Tiefenabschnitt [cm]	Ø Sed.-Rate [cm/k[r]a]	Referenz
		$\delta^{18}\text{O}$ -Stufe (Grenze)	[radiom. Jahre]			
RC11-120	440	5/6	127.000	0-440	3,46	Broecker & van Donk (1970)
E49-18	490	5/6	127.000			
E49-18	1405	11/12	440.000	490-1405	2,92	Shackleton & Opdyke (1973)

**Tab. 7** Konstruktion der SIMPLEX-Chronologien und -Zeitreihen (Kerne RC11-120, E49-18).

An zwei Ankerpunkten werden radiometrische Alterswerte auf die Sauerstoffisotopenprofile (-stufen) und damit auf die Sedimentsäule übertragen. Die dadurch gewonnene durchschnittliche Sedimentationsrate wird für den gesamten Kern (RC11-120) bzw. den Kernabschnitt  $\geq 4,9$  m (E49-18) übernommen (Interpolation). Mit diesen sog. SIMPLEX-Chronologien wird jede Wertereihe in eine Zeitreihe überführt. SHACKELTON & OPDYKE (1973) ermittelten das [radiometrische] Alter der Stufengrenze 11/12 durch Interpolation; Grundlage war die radiometrisch datierte Brunhes/Matuyama-Grenze mit 700.000 [radiometrischen] Jahren (etwa an der Stufengrenze 19/20) und eine daraus ermittelte durchschnittliche Sedimentationsrate (Kern V28-238). Nach HAYS et al. (1976), u. a. ihre Table 2.

In der weiteren Entwicklung werden auf Basis der zuvor linear-zeitinterpretierten „Rohdaten“ (den SIMPLEX-Zeitreihen) die sog. ELBOW-Chronologien erstellt; mit der Einphasung auf den theoretischen Obliquitäts- und Präzessionszyklus sowie dem Zusammenschritt der Kerne (combined PATCH) werden die „Rohdaten“ signifikant modifiziert. Für die finalen TUNE-UP-Chronologien werden schließlich die künstlichen ELBOW-Zeitreihen einer Korrektur unterzogen und weiter verändert.

Das Test-Prozedere sowie die Validierung des Testergebnisses bestimmen HAYS et al. selbst: Es umfasst das Aufspüren beider [theoretischer] Orbital-Frequenzen in einem Verhältnis um 1,8 (Frequenzbereichstest)<sup>57</sup> sowie die Untersuchung der Phasenkohärenz zwischen den Klimaaufzeichnungen und der postulierten Orbitalsteuerung (Zeitbereichstest)<sup>58</sup>.

### **Methodik III: Programme und Analysetechnik**

Die numerische Prozedur umfasst insgesamt zehn sequentielle Schritte:

- i) Selektion einer absoluten Chronologie;

<sup>57</sup> „Our frequency-domain tests use the numerical techniques of spectral analysis and are designed to seek evidence for a concentration of spectral energy at the frequencies of variation in obliquity and precession. We consider that support for the hypothesis can be decisive if both frequencies are detected and, to allow for geochronological uncertainties, if it can be clearly demonstrated that the ratio of the two frequencies detected does not differ significantly from the predicted ratio (about 1.8)“ (HAYS et al. 1976, 1122).

<sup>58</sup> „Finally, our time-domain tests are designed to examine the phase coherence between the three climatic records and between each record and the postulated forcing function. To this end we use the numerical techniques of bandpass filter analysis. Such an approach makes it possible to examine separately the variance components of the geological records that correspond in frequency to the variations of obliquity and precession“ (HAYS et al. 1976, 1122).

- ii) Kalkulation einer Zeitreihe;
- iii) Trendeliminierung;
- iv) „Vorglättung“ (prewhitening; optional);
- v) Wahl der Frequenzintervalle/maximalen Verschiebung (lagging);
- vi) Kalkulation der Autokovarianzfunktion;
- vii) Glättung mit einem HAMMING-Fenster (Filterfunktion);
- viii) spektrale Schätzung;
- ix) Skalierung;
- x) statistische Evaluierung.

Für die Schritte (iii) bis (viii) ist das Kalkulationsprogramm BMD02T verwendet worden.

### ***Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Autoren***

Die Zusammenfassung von HAYS et al. (1976, 1131) legt abschließend dar, dass der vollzogene geologische Test erfolgreich war:

- (1) Im Frequenzbereich 0,0001 bis 0,00001 Zyklen pro [radiometrisches] Jahr konzentrieren sich die klimatischen Varianzen der untersuchten Klimaindikatoren in drei diskreten spektralen Peaks mit Perioden von 23.000, 42.000 und ungefähr 100.000 [radiometrischen] Jahren. Diese Peaks korrespondieren zu den dominanten Perioden der Erdumlaufbahn [Milankovitch-Zyklen].
- (2) Die 42.000-Jahr-Klimakomponente [radiometrische Jahre] hat die gleiche Periode wie der [theoretische] Obliquitätszyklus und hält mit ihm eine konstante Phasenbeziehung bei. Dasselbe gilt für die 23.000-Jahr-Klimakomponente [radiometrische Jahre] und den [theoretische] Präzessionszyklus.
- (3) Die dominante 100.000-Jahr-Klimakomponente [radiometrische Jahre] hat eine durchschnittliche Periode nahe zu und in Phase mit der [theoretischen] orbitalen Exzentrizität.

Sie folgern daraus, „(...) dass Änderungen in der Geometrie der Erdumlaufbahn die fundamentale Ursache für die Abfolge quartärer Vereisungen sind.“ Als Ergänzung zur Überschrift formulieren sie: „Für [die vergangenen, M. K.] 500.000 Jahre sind bedeutende klimatische Änderungen den Variationen von Obliquität und Präzession gefolgt.“

### ***Diskussion***

Dem ersten Anschein nach präsentier(t)en HAYS et al. der Wissenschaftsgemeinschaft eine überzeugende Arbeit. Denn, so Co-Autor IMBRIE, wollten die meisten Wissenschaftler sich „(...) nur dann von der Astronomischen Theorie überzeugen lassen, wenn bewiesen werden konnte, dass die kleinen, dem 100 000-Jahr-Zyklus überlagerten Schwingungen jene wären, die Milankovitch vorausgesagt hatte. Stellten sich diese kürzeren Klimazyklen als übereinstimmend mit dem 41 000-Jahr-Zyklus der Achsenneigung und dem 22 000-Jahr-Zyklus der Präzession heraus, dann wäre die Astronomische Theorie der Eiszeiten bestätigt“ (IMBRIE & IMBRIE 1981, 193).

Die nachfolgende Diskussion konzentriert sich auf drei Bereiche: Rohdaten, Tuning, Basisannahme.

**Rohdaten.** Von den Werte- bzw. Zeitreihen sind die Rohdatenreihen von besonderem Interesse. HAYS et al. zeigen als Ergebnis ihrer spektralen Analyse der radiometrisch (linear) kalibrierten Zeitreihen (zeitinterpretierte „Rohdaten“, ihre SIMPLEX-Zeitreihen) für beide Kerne und für alle drei Variablen (*C. davisiana* eingeschränkt) Perioden und Perioden-Verhältnisse, die denen der [theoretischen] Orbitalspektren ähneln. Sie schlagen vor (suggest), dass Peaks im definierten Bandbereich ‚b‘ und ‚c‘ eine Response auf den [theoretischen] Obliquitäts- bzw. Präzessionszyklus repräsentieren (siehe Tab. 8).

In der Folge werden die Werte- bzw. (linear kalibrierten) Zeitreihen und ihre Varianzspektren im Vergleich zu HAYS et al. beschrieben<sup>59</sup>:

(1) Kern RC11-120,  $\delta^{18}\text{O}$ -Reihe (Abb. 10a, Abb. 11a, Abb. 11b, Tab. 8, Tab. 9, Abb. 39).

Das  $\delta^{18}\text{O}$ -Profil zeigt ein markantes (rhythmisches) „Sägezahn“-Muster (Abb. 10a): zwei Mal ein abrupter Abfall der  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte auf ein Minimum (bei etwa 420 cm und 0 cm) nach jeweils einem oszillierenden Anstieg auf ein Maximum (bei etwa 480 cm und 80 cm). Demzufolge beherrschen die zwei (extremen) Maximum/Minimum-Sprünge das Spektrum (Abb. 11a, markante/signifikante Frequenz von 0,00278 Zyklen/cm). Die entsprechende Überführung dieser Variation der  $\delta^{18}\text{O}$ -Reihe in eine Sinusfunktion zeigt 2,6 Perioden mit einer Periodenlänge von 360 cm des nur 950 cm langen Kerns (Abb. 39). Als Periodizität kann dieses zweimalige Auftreten allerdings nicht bezeichnet werden.

(2) Kern RC11-120, SST-Reihe (Abb. 10b, Abb. 11c, Abb. 14b, Tab. 8, Tab. 9).

Visuell wird die SST-Kurve (Abb. 10b) – ausgehend von einer gedachten Basis von etwa 7-8 °C – von drei deutlichen Temperatur-Ausschlägen (Maxima bei 770, 430 und 30 cm) dominiert, wobei der erste Ausschlag nicht so isoliert auftritt wie der zweite und der dritte Ausschlag (am Rand) kein Minima ausbildet. Dazwischen treten unregelmäßig zahlreiche kleinere Ausschläge auf, die oft durch einzelne Wertepaare verursacht sind.

Ähnlich wie bei der  $\delta^{18}\text{O}$ -Reihe dominieren diese extremen Ausschläge das Varianzspektrum (Abb. 11c); der signifikante Peak hat eine Periode von 346 cm. Da sich das 2. und 3. Maximum etwa synchron zu den Minima der  $\delta^{18}\text{O}$ -Reihe verhalten (vgl. Abb. 10a mit Abb. 10b), sind auch ihre Perioden annähernd übereinstimmend.

Der zweistärkste Peak mit einer Periode von 83 cm (0,012 Zyklen/cm, 24 k[r]a) ist die Frequenz, die nach HAYS et al. mit dem Präzessionszyklus korrespondiert (ihre Analyse: 21.000 [radiometrischen] Jahre; vgl. Tab. 8 mit Tab. 9) und ihrer Aussage zufolge in der SST-Reihe identifiziert und damit (erstmalig überhaupt) nachgewiesen werden konnte. Die Periode von 83 cm ist visuell nicht erkennbar (Abb. 14b).

Zwischen diesen beiden Peaks treten fünf weitere Peaks auf, alle unterhalb der Signifikanz-Level; für diesen Frequenzbereich weisen HAYS et al. lediglich eine Periode von 38 k[r]a aus. Ein aussagekräftiges b/c-Verhältnis kann im Vergleich zu HAYS et al. nicht gebildet werden.

<sup>59</sup> Die stratigraphische Beschreibung erfolgt vom Liegenden zum Hangenden.

Chronologien/ Zeitreihen	Bohrkern	Zeitintervall [k[a/r]a]	theoretisches Orbitalspektrum/ Variable	definierte Frequenzbänder, Perioden [k[a/r]a]					b/c	n
				a	b		c			
SIMPLEX	n. z.	0-273	Obliquität/ Präzession		40,8		22,6		1,8	
	RC11-120	0-273	$\delta^{18}\text{O}$	91	38		23		1,7	91
			Ts (SST)	87	38	<u>21</u>	-	1,8	91	
			C. davisiana	106	<u>37</u>	-			91	
	n. z.	127-489	Obliquität/ Präzession		41,1		21,9		1,9	
	E49-18	127-489	$\delta^{18}\text{O}$	109	47		24		1,9	121
			Ts (SST)	94	43		24		1,8	121
C. davisiana			119						121	
						$c_1$	$c_m$	$c_2$	$b/c_1$	
ELBOW (prewhitened)	n. z.	0-468	Obliquität/ Präzession		41,1	23,1	21,8	18,8	1,78	
	RC11-120/ E49-18 kombiniert	0-489(?)	$\delta^{18}\text{O}$		43*	24	22	19,5	1,8	
			Ts (SST)		42	24*	22*	19,5	1,8	
			C. davisiana		42*	24	22	19,5	1,7	

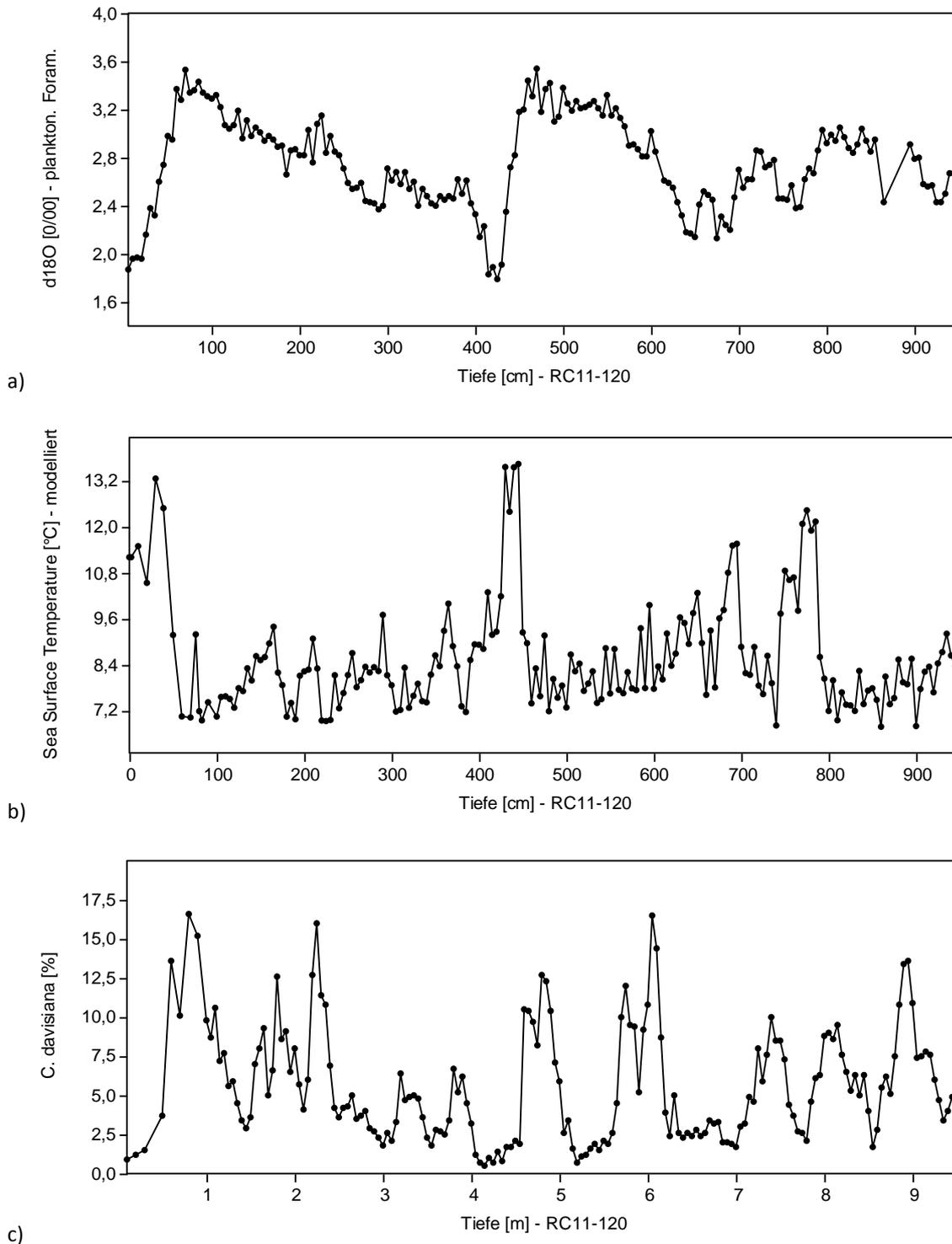
**Tab. 8** Spektrale Analyse der SIMPLEX- und ELBOW-Zeitreihen (Kerne RC11-120, E49-18).

Nach HAYS et al. (1976), ihre Tables 3 und 4. Für die zwei kurzen Kerne bzw. einem gewählten Kernabschnitt (SIMPLEX-Zeitreihen) weisen sie für die drei Variablen in 5 von 6 Fällen Perioden und Perioden-Verhältnisse aus, die denen der [theoretischen] Orbitalspektren der Obliquität und Präzession ähneln. Die Autoren schlagen vor, dass Peaks im definierten Bandbereich ‚b‘ und ‚c‘ eine Response auf den [theoretischen] Obliquitäts- bzw. Präzessionszyklus repräsentieren. Die zielgerichtet konstruierte ELBOW-Zeitreihe zeigt eine große (bessere) Übereinstimmung mit den zuvor genannten Orbitalzyklen. Diskussion siehe Textteil, Variablen siehe Methodik. Legende: n = Anzahl Wertepaare; unterstrichen = dominanter Peak;  $c_1$ ,  $c_2$  = Subpeaks,  $c_m$  = Peak-Mittelwert; n. z. = nicht zutreffend; \* = Signifikanz-Level von 0,05.

Bohrkern	Tiefe	Variable	definierte Frequenzbänder, Perioden [k[r]a]					b/c	n
			a		b		c		
RC11-120	0-9,5 m	d180	<u>104</u>	64	36		(24)	(1,5)	183
		Ts (SST)	<u>100</u>	(5 Peaks)			24	?	184
		C. davisiana	103		<u>38</u>	30	(24,21)	(1,6;1,8)	179
		d13C	95	57,46	<u>38</u>		(24)	(1,6)	182
		CaCO <sub>3</sub>	110	(71,55,45)	37		(23)	(1,6)	94
E49-18	0-15,5 m	CaCO <sub>3</sub>	99	(66)	(44,38)	(28)	(20)	(2,2;1,9)	156
	4,9-14 m	CaCO <sub>3</sub>	100	(60)	(40)	(29)	(21)	(1,9)	92

**Tab. 9** Spektrale Analyse ausgewählter Rohdatenreihen (Kerne RC11-120, E49-18).

Die Reihen sind linear-zeitkalibriert mit den Sedimentationsraten der Tab. 7. Diese Analyse des Verfassers auf Basis der Daten von IMBRIE et al. (1984) und MARTINSON et al. (1987) ist mit den Ergebnissen von HAYS et al. (1976) zu vergleichen (Tab. 8, nur SIMPLEX-Zeitreihe): Es sind deutlich mehr Peaks ausgebildet, darunter zahlreiche unterhalb des Signifikanz-Niveaus von 95 %; die Aussagekraft des Quotienten b/c ist fraglich (Diskussion siehe Textteil). Legende wie Tab. 8, zugehörige Graphiken und Lomb-Periodogramme inkl. Angabe zu den verwendeten Dateien siehe Abb. 10 bis Abb. 16.



**Abb. 10** Rohdatenreihen  $\delta^{18}\text{O}$ , Ts und *C. davisiana* (Kern RC11-120).

Messungen am Tiefseebohrkern RC11-120 und Abtragung der Variablen mit der Tiefe; Punkt-/Liniendarstellung vom Hangenden (0 m) zum Liegenden (9,5 m). a)  $\delta^{18}\text{O}$ -Reihe,  $n = 183$ ; Datei: rc11120i.stretch. b) SST-Reihe (Oberflächentemperatur Ts),  $n = 184$ ; Datei: specmap.051. c) *C. davisiana*-Reihe,  $n = 179$ ; Datei: RC11-120\_stab\_iso\_SST.

(3) Kern RC11-120, *C. davisiana*-Reihe (Abb. 10c, Abb. 11d, Abb. 14b, Tab. 8, Tab. 9).

Die *C. davisiana*-Reihe zeigt – ausgehend von einer gedachten Basis von etwa 1-3 % relativer Häufigkeit – in unregelmäßigen Abständen wiederholt Konzentrationszunahmen mit unterschiedlicher Ausprägung (Abb. 10c). Das Varianzspektrum wird von einem markan-

ten/signifikanten Peak dominiert (0,768 Zyklen/cm, 38 k[r]a), mit einer Periode von etwa 130 cm (Abb. 11d). Die zugehörige Sinusfunktion zeigt visuell nur eine teilweise Übereinstimmung von Minima und Maxima (Abb. 14b). Diese Periode korrespondiert nach HAYS et al. mit dem [theoretischen] Obliquitätszyklus (ihre Analyse: 37.000 [radiometrischen] Jahre).

Die weiteren Peaks des Lomb-Periodogramms im Bereich der Signifikanz-Level und darunter liegen sowohl innerhalb als auch außerhalb der von HAYS et al. definierten Frequenzband-Einteilung. Es treten Perioden auf, die HAYS et al. nicht ausgewiesen haben (vgl. Tab. 8 mit Tab. 9).

(4) Kern E48-18, CaCO<sub>3</sub>-Reihe (Abb. 12, Abb. 13, Tab. 9).

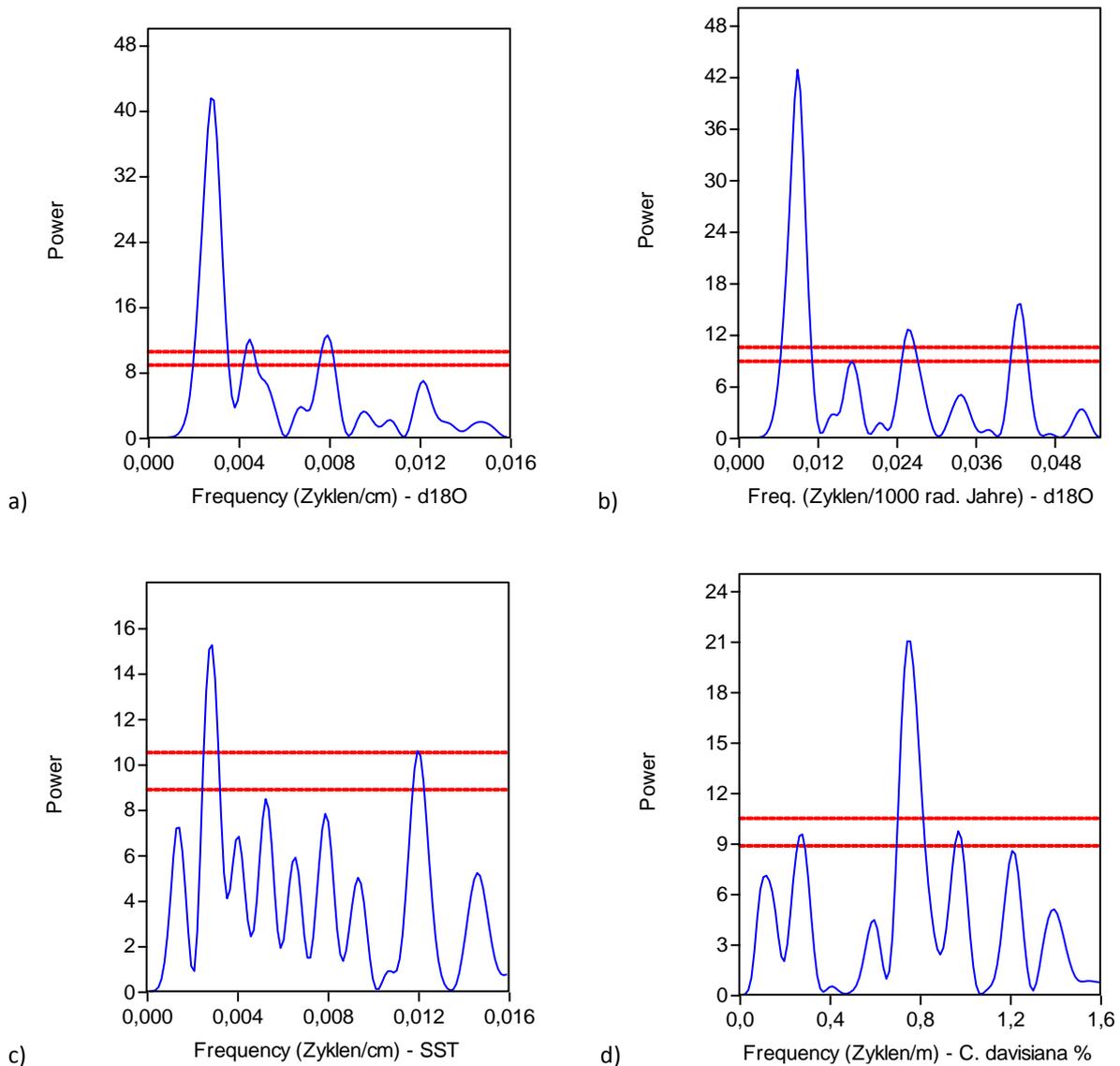
Die CaCO<sub>3</sub>-Gehalte variieren stark in einem Korridor hauptsächlich zwischen 20 und 80 %; visuell ist keine Regelmäßigkeit erkennbar, eventuell sind fünf bis sechs Minima/Maxima-Extreme ausgebildet Abb. 12. Die Varianzspektren zeigen jeweils einen dominanten Peak, für die gesamte Reihe mit einer Periodenlänge von 288 cm (Abb. 13a) und für den Ausschnitt zwischen 4,9 und 14,0 m von 291 cm (Abb. 13b). Umgerechnet (zeitkalibriert) entsprechen diese Längen einer Periodendauer von 99.000 bzw. 100.000 [radiometrischen] Jahren. Dominante (signifikante) Peaks, die dem Frequenzspektrum der theoretischen Obliquitäts- bzw. Präzessionszyklen zugewiesen werden könnten, liegen nicht vor; weitere Peaks unterhalb der Signifikanz-Level liegen sowohl innerhalb als auch außerhalb der von HAYS et al. definierten Frequenzbänder. HAYS et al. (ihre Fig. 3) zeigen für die CaCO<sub>3</sub>-Reihe kein Varianzspektrum.

(5) Kern RC11-120, CaCO<sub>3</sub>- und δ<sup>13</sup>C-Reihe (Abb. 15, Abb. 16, Tab. 9).

Die Reihen verlaufen hinsichtlich einiger Minima und Maxima jeweils bezogen auf die Tiefe synchron, mit Ausnahme des CaCO<sub>3</sub>-„Ausreißers“ bei etwa 330 cm (Abb. 15, Abb. 16). Auch die Lomb-Periodogramme sind hinsichtlich der zwei signifikanten Peaks ähnlich. Wie bei den zuvor genannten Spektren treten aber weitere Peaks auf, die nicht in die von HAYS et al. definierten Frequenzband-Einteilung passen (Tab. 9).

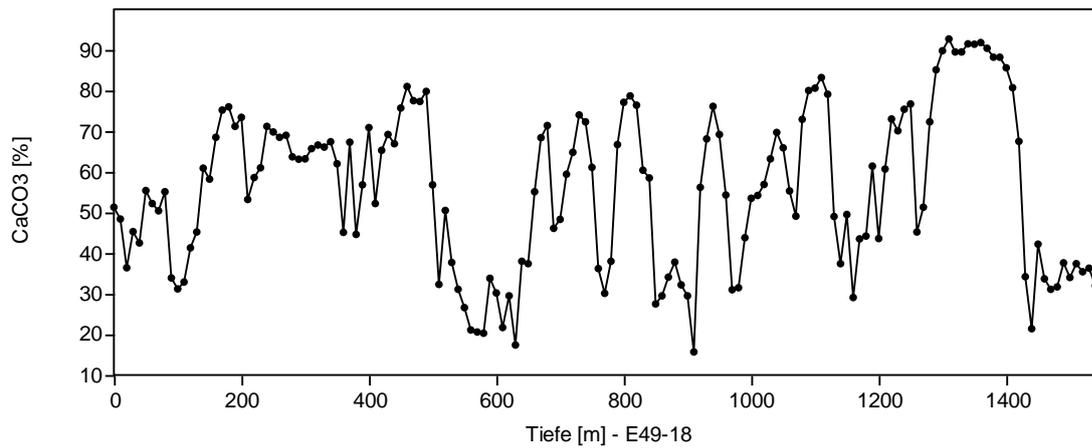
Nach MARTINSON et al. (1987) dient(en) die ungetunten Zeitreihen (Kern RC11-120) der Variablen Ts (SST) und *C. davisiana* insbesondere zur Demonstration eines dominanten Peaks im Frequenzbereich des [theoretischen] Präzessionszyklus bzw. des [theoretischen] Obliquitätszyklus. Die Varianzspektren der analysierten Rohdaten zeigen Peaks mit diesen Frequenzen (s. o.), aber die Rohdaten-Lage ist nicht so eindeutig wie von HAYS et al. dargestellt: Es sind weitere Peaks außerhalb des Frequenzbandmusters a-b-c vorhanden; es herrscht Unklarheit über die Signifikanz und Aussagekraft zahlreicher Peaks; das Verhältnis b/c ist aufgrund der zwei erstgenannten Punkte fraglich und liegt außerhalb der angestrebten Bandbreite von  $1,8 \pm 0,1$ ; es sind nicht eindeutig 5 von 6 Fällen mit Perioden, die den [theoretischen] Orbitalspektren der Obliquität und Präzession ähneln. HAYS et al. (S. 1127) hatten ihre publizierten Spektren bereits um Harmonische<sup>60</sup> („Nebenmaxima“) und Frequenzmissdeutung (aliasing) bereinigt, eine subjektive Maßnahme.

<sup>60</sup> Schwingung, deren Frequenz ein ganzzahliges Vielfaches einer Grundfrequenz ist. Die Harmonische ist eine uneigenständige Schwingung.



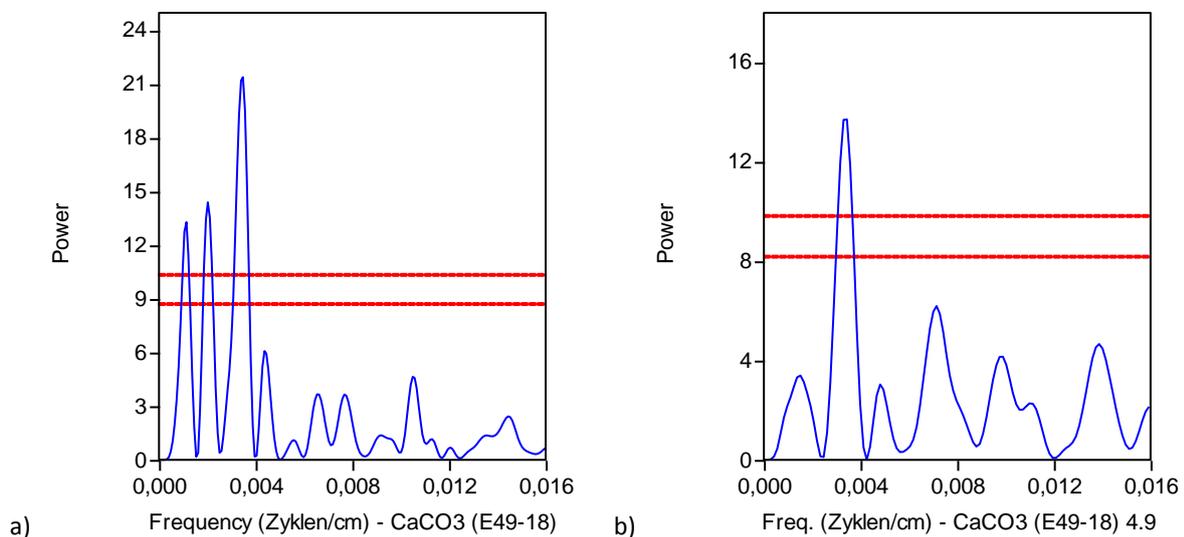
**Abb. 11** Lomb-Periodogramme der Reihen  $\delta^{18}\text{O}$ , Ts und *C. davisiana* (Kern RC11-120).

Rohdaten mit Ausnahme von ‚b‘: a)  $\delta^{18}\text{O}$ -Reihe; Peaks: 0,00278/0,00450/0,00794/(0,01217) Zyklen/cm, entsprechen Perioden von 3,59/2,22/1,26/(0,82) m, zeitkalibriert (Faktor siehe Tab. 7) 104/64/36/(24) k[r]a; Verhältnis b/c (vgl. Tab. 9), Peak 3/Peak 4 = (1,5). b) Getunte  $\delta^{18}\text{O}$ -Zeitreihe; Peaks: 0,0090/(0,0171)/0,0257/0,0429 Zyklen/k[r]a, entsprechen Perioden von 111/(58,5)/38,9/23,3 k[r]a; Verhältnis b/c, Peak 3/Peak 4 = 1,7. Durch das Tuning sind die Verhältnisse angepasst und Energien umverteilt worden; Stärkung des 4., Abbau des 2. Peaks (im Vergleich zu Abb. 11a). c) SST-Reihe; Peaks: 0,00289/(0,0120) Zyklen/cm, entsprechen Perioden von 3,46/(0,83) m, zeitkalibriert 100/(24) k[r]a; Verhältnis b/c = ? d) *C. davisiana*-Reihe; Peaks: (0,2793)/0,7680/(0,9707)/(1,210)/(1,397) Zyklen/cm, entsprechen Perioden von (3,58)/1,30/(1,03)/(0,83)/ (0,72) m, zeitkalibriert (103)/38/(30)/(24)/(21) k[r]a; Verhältnis b/c = (1,6/1,8); 1. Peak nicht berücksichtigt, da wahrscheinlich Nebenmaximum (Harmonische). – Diskussion siehe Textteil, Dateien wie Abb. 10; Legende: Signifikanz-Level von 95/99 % ( $\alpha = 0,05/0,01$ ; untere/obere rote Linie); () = Werte unterhalb der Signifikanz-Level.



**Abb. 12**  $\text{CaCO}_3$ -Rohdatenreihe (Kern E49-18).

Messungen am Tiefseebohrkern E49-18 und Abtragung der Variable mit der Tiefe; Punkt-/Liniendarstellung ( $n = 156$ ) vom Hangenden (0 m) zum Liegenden. Datei: e49-18-r-tab.txt.



**Abb. 13** Lomb-Periodogramme der  $\text{CaCO}_3$ -Wertreihe (Kern E49-18).

a) Gesamtprofil (0-15,5 m); Peaks: [0,00113]/[0,002019]/0,003472 Zyklen/cm, entsprechen Perioden von [8,84]/[4,95]/2,88 m, zeitkalibriert (Faktor siehe Tab. 7) [303]/[170]/99 k[r]a. b) Ausschnitt (4,9-14,0 m); Peak: 0,003434 Zyklen/cm, entspricht einer Perioden von 2,91 m, zeitkalibriert 100 k[r]a. – Diskussion siehe Textteil, Datei wie Abb. 12; Legende: Signifikanz-Level von 95/99 % ( $\alpha = 0,05/0,01$ ; untere/obere rote Linie); () = Werte unterhalb der Signifikanz-Level; [] = ggf. virtuelle Nebenmaxima (Harmonische).

Des Weiteren schließen sie signifikante Unterbrechungen der Sedimentation, eine weitere substantielle Annahme, aus.<sup>61</sup> Es ist weiter festzustellen, dass – wenn reale Zyklen vorliegen sollten – die Anzahl der jeweiligen Perioden gering ist und eine Periodizität als solche in Frage stellt. Das war auch HAYS et al. bewusst; den „kurzen“ SIMPLEX-Zeitreihen räumten sie

<sup>61</sup> „Although uniform sedimentation is an ideal which is unlikely to prevail precisely anywhere, the fact that the characteristics of the oxygen record are present throughout the cores suggests that there can be no substantial lacunae, while the striking resemblance to records from distant areas shows that there can be no gross distortions of accumulation rate“ (HAYS et al. 1976, 1125).

– auch wegen einer angenommenen limitierten chronologischen Kontrolle – nicht viel Vertrauen bezüglich der Genauigkeit der Schätzungen ihrer konstituierenden Frequenzen ein.<sup>62</sup>

**Zwischenfazit.** HAYS et al. wählten aus Hunderten von Tiefseebohrkernen jene aus, deren Proxy-Reihen „zyklische“ Muster aufwiesen und deren zeitinterpretierte Frequenzen mit den Frequenzen des Obliquitäts- und Präzessionszyklus korrespondieren. Für den Frequenzbereich von  $10^{-4}$  bis  $10^{-5}$  Zyklen pro [radiometrisches] Jahr (entspricht Perioden von 10.000 bis 100.000 [radiometrischen] Jahren) und einer durchschnittlichen Sedimentationsrate von 3 cm pro tausend [radiometrische] Jahre ergeben sich Zyklen im Bereich von 30 bis 300 cm. Mit anderen Worten: Sedimentfolgen, mit sich wiederholenden Charakteristika im Dezimeter- bis Meterbereich, auf Basis einer radiometrischen Kalibrierung werden immer Perioden „tragen“, die zwangsläufig (zufällig) mit einer Milankovitch-Periodizität übereinstimmt (siehe Abschnitt 6.2).

**Tuning.** Mit Einphasung auf die theoretischen Orbitalzyklen der Präzession und Obliquität, die Tuning-Zielkurven<sup>63</sup> (vgl. Abschnitte 4.4 und 4.5), und dem Zusammenschritt der Sedimentkerne (combined PATCH) entstehen aus den zuvor linear-zeitinterpretierten „Rohdaten“ (SIMPLEX-Zeitreihen) die ELBOW-Zeitreihen. Dabei werden die Ursprungsdaten (zielgerichtet und subjektiv) signifikant modifiziert<sup>64</sup>; Ausfluss dieser Maßnahme ist eine variable Sedimentationsrate. Durch weitere Korrekturen (weitere Änderungen der Daten) entstehen die finalen TUNE-UP-Zeitreihen bzw. -Chronologien. Die TUNE-UP-Zeitreihen sind so gut eingephasst, dass die maximale Abweichung zu den Zielkurven (nur) 1.000 [radiometrische] Jahre beträgt.<sup>65</sup>

Diese Phasenübereinstimmungen stellen HAYS et al. in ihrer Zusammenfassung besonders heraus<sup>66</sup> (s. o., Abschnitt Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Autoren, Punkt 2 und 3); es sind ihre Hauptgründe für ihre Schlussfolgerung einer Orbitalsteuerung der Eiszeiten. Diese „Passgenauigkeit“ aber ist dem Tuning geschuldet und künstlich erzwungen. Wird sie als Argument für eine Orbitalsteuerung verwendet, handelt es sich um einen Zirkelschluss (Abschnitt 6.3).

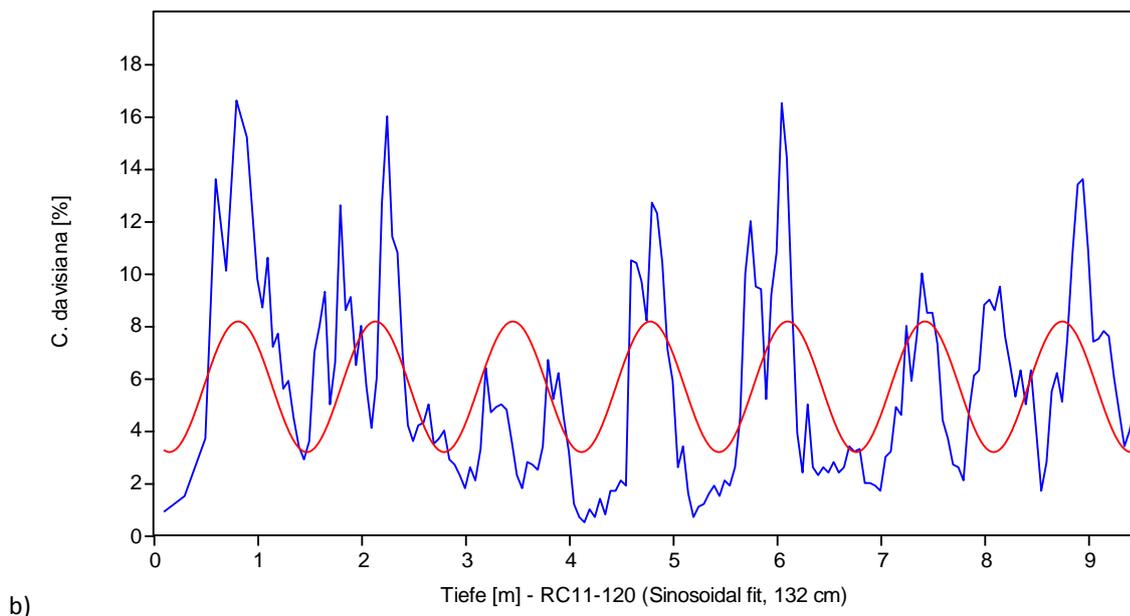
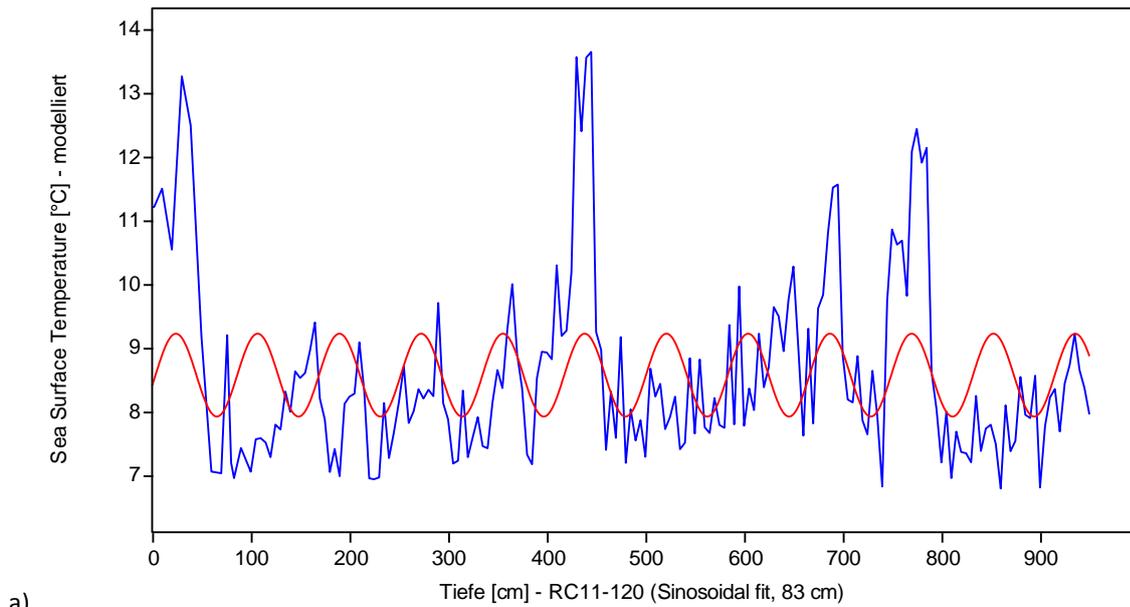
<sup>62</sup> „Because the SIMPLEX time series are undesirably short and are based on limited chronological control, we do not place much reliance on the accuracy of estimates of their constituent frequencies“ (HAYS et al. 1976, 1126).

<sup>63</sup> Orbitaldaten von VERNEKAR (1972).

<sup>64</sup> Schon mit geringfügigen Veränderungen der Sedimentationsrate können Zufallspicks mit einer gewünschten (kurzperiodischen) Zieloszillation in Phase gebracht werden: „It is also true that the short period oscillations such as the 41 kyr peak can easily be artificially enhanced. Minor adjustments to the sedimentation rate of  $\pm 20$  kyr can bring any random peak into phase with an expected 41 kyr target oscillation“ (MULLER & MACDONALD 2000, 134).

<sup>65</sup> „In the frequency domain, estimates for spectral peaks calculated from the TUNE-UP time series match those predicted for obliquity and precession within 1000 years (Table 5)“ (HAYS et al. 1976, 1125).

<sup>66</sup> Ihre Punkte 3, 4 und 5 unter Summary (HAYS et al. 1976, 1131).



**Abb. 14** Wertereihen mit ausgewählten, isolierten Perioden (Kern RC11-120).

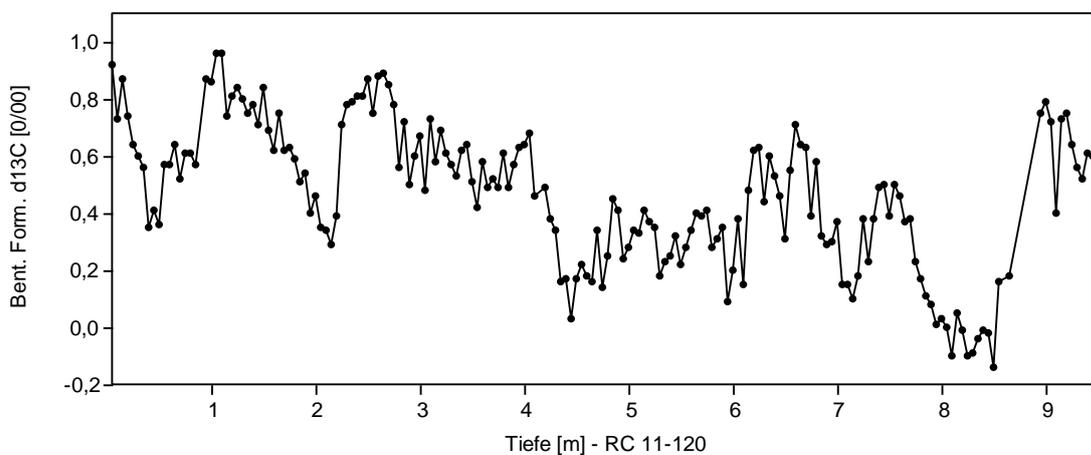
Die durch die Fourier-Transformation (FFT) ermittelten (Schätz-) Perioden (sinusoidale Passungen) sind visuell nicht erkennbar; nur teilweise ist eine Periodenübereinstimmung zu erkennen (Diskussion siehe Textteil). a) SST-Reihe (Oberflächentemperatur  $T_s$ ): 83-cm-Periode. b) *C. davisiana*-Reihe: 132-cm-Periode. – Dateien siehe Abb. 10.; Legende: blau = Wertereihen, rot = isolierte Periode.

**Basisannahme.** Eine essentielle Annahme von HAYS et al. ist die eines linearen Systems.<sup>67</sup> Anstelle zweier (postulierter) operierender Systeme, (a) eines *Radiation*-Systems, das [theoretische] orbitale Signale in Insolationssignale, und (b) eines *Klima-Response*-Systems, das sodann die Insolationssignale in (voraussagbare) klimatische Kurven transformiert, postulie-

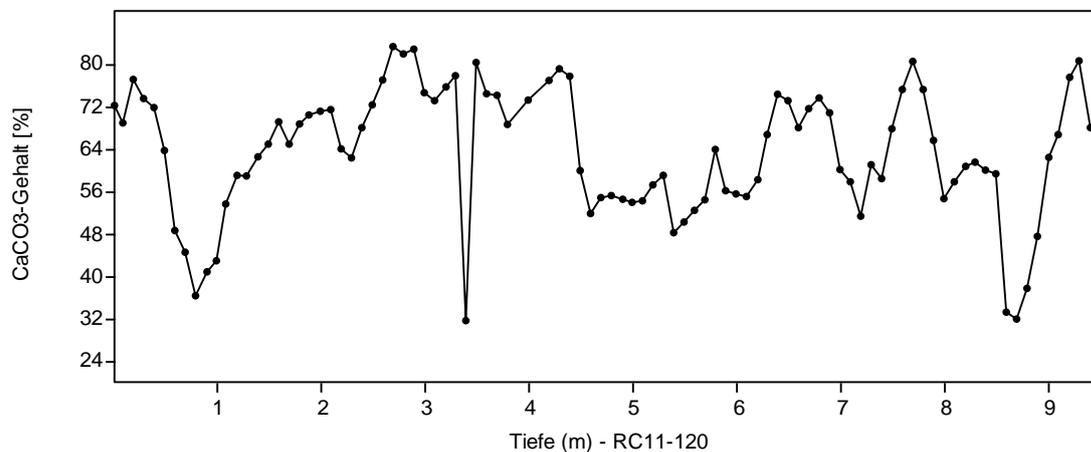
<sup>67</sup> HAYS et al. (1976, 1125 u. 1127): „The dynamics of our model are fixed by assuming that the system is a time-invariant, linear system – that is, that its behaviour in the time domain can be described by a linear differential equation with constant coefficients.” Und: „As with the frequency domain test, we start here with the assumption that the radiation- climate system is time invariant and linear.”

ren sie ein einfaches *Radiation-Klima-System*, also die unmittelbare Transformation von orbitalen Inputs in klimatische Outputs. Der Vorteil einer A-priori-Annahme einer (einfachen) linearen Steuerung liegt darin, dass eine mögliche „Überprüfung“ vorgezeichnet wird, nämlich die Suche nach – als Klimaindikatoren ausgewiesenen – Proxies, die ein entsprechendes (korrelierbares) Zeit-periodisches Verhalten aufweisen. Mit anderen Worten: Es werden vorab Konditionen festgelegt, die eigentlich durch eine Analyse bzw. durch einen Test herausgefunden werden soll(t)en. Diese zielorientierte (simple) Konstruktion ist die Grundlage zu einer eigen-konstruierten Beweisführung mit einem eigens dafür gewählten „Testaufbau“.

SMITH (1994) zeigt auf, dass das stratigraphische System hochkomplex ist und Charakteristika dynamischer (chaotischer) Systeme zeigt (siehe Abschnitt 6.1).



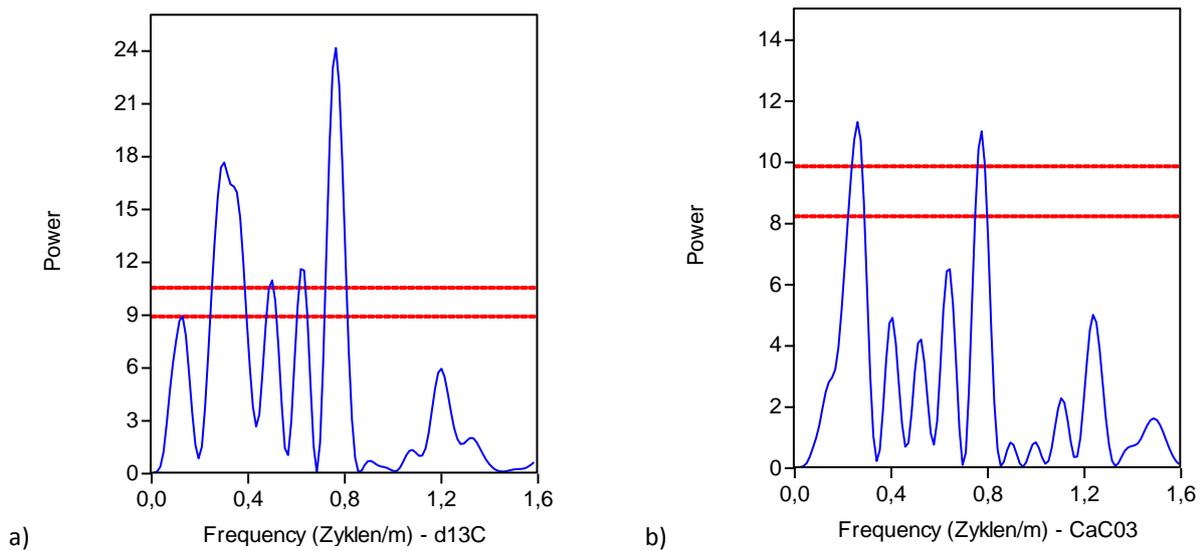
a)



b)

**Abb. 15**  $\delta^{13}\text{C}$ - und  $\text{CaCO}_3$ -Rohdatenreihe (Kern RC11-120).

Messungen am Tiefseebohrkern RC11-120 und Abtragung der Variablen mit der Tiefe; Punkt-/Liniendarstellung vom Hangenden (0 m) zum Liegenden. a)  $\delta^{13}\text{C}$ -Reihe, n = 182; Datei: RC11-120\_stab\_iso\_SST. b)  $\text{CaCO}_3$ -Reihe, n = 94; Datei: RC11-120\_stab\_iso\_SST.



**Abb. 16** Lomb-Periodogramme der  $\delta^{13}\text{C}$ - und  $\text{CaCO}_3$ -Reihe (Kern RC11-120).

a)  $\delta^{13}\text{C}$ -Reihe; Peaks: (0,1323)/0,3042/0,5027/0,6217/0,7672/(1,2007) Zyklen/m, entsprechen Perioden von (7,56)/3,29/1,99/1,61/1,30/(0,83) m, zeitkalibriert (Faktor siehe Tab. 7) (218)/95/57/46/38/(24) k[r]a; Verhältnis b/c = 1,6 (siehe Tab. 9). b)  $\text{CaCO}_3$ -Reihe; Peaks: 0,2637/(0,4088)/(0,5274)/(0,6461)/0,778/(1,2395) Zyklen/m, entsprechen Perioden von (7,56)/3,29/1,99/1,61/1,30/0,83 m, zeitkalibriert 110/(71)/(55)/(45)/37/(23) k[r]a; Verhältnis b/c = 1,6. – Diskussion siehe Textteil, Dateien wie Abb. 15; Legende: Signifikanz-Level von 95/99 % ( $\alpha = 0,05/0,01$ ; untere/obere rote Linie); () = Werte unterhalb der Signifikanz-Level.

**Ein eindeutiger Beweis?** IMBRIE zufolge, dem Co-Autor der „Pacemaker-Studie“, „(...) bestätigten zwei Kerne aus dem Indischen Ozean die Astronomische Theorie der Eiszeiten“; die Geologen hätten einen eindeutigen Beweis dafür in der Hand, „(...) dass die Bewegungen der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne die Spätpleistozän-Eiszeiten auslösten“ (IMBRIE & IMBRIE 1981, 210).<sup>68</sup> Was soll dieser eindeutige Beweis sein? Die oben aufgezeigten Punkte machen deutlich, dass hier keine valide Schlussfolgerung vorliegt. Es hat den Anschein, als handele es sich um eine selbst erfüllende Prophezeiung. Aus einer „vorgeschlagenen Beziehung“ war schnell eine Tatsache geworden (siehe Abschnitt 6.4).

### Systematik

Tuning.

### Fazit

Die Arbeit von HAYS et al. (1976) ist zielgerichtet auf eine Bestätigung der „Astronomischen Theorie der Eiszeiten“ hin durchgeführt worden (vgl. IMBRIE & IMBRIE 1981). Hierbei sind die (radiometrisch) linear-zeitkalibrierten „Roh“wertreihen durch Einphasung (Tuning) auf theoretische Orbitalzyklen (Milankovitch-Zyklen) signifikant modifiziert und die neu geschaf-

<sup>68</sup> Das vollständige Zitat: „Ein Jahrhundert nachdem Croll seine Theorie veröffentlicht und 50 Jahre nachdem Milankovitch seine Strahlungskurven an Köppen und Wegener geschickt hatte, bestätigten zwei Kerne aus dem Indischen Ozean die Astronomische Theorie der Eiszeiten. Endlich hatten die Geologen einen eindeutigen Beweis in der Hand, dass die Bewegungen der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne die Spätpleistozän-Eiszeiten auslösten“ (IMBRIE & IMBRIE 1981, 209-210).

fenen Chronologien bzw. Zeitreihen final weiter verändert worden. Wird ihren Annahmen, ihrer Methodik und ihrem System aus zahlreichen Verfahren kritiklos gefolgt, so haben (hätten) HAYS et al. in einem Einzelfall Indizien für die Orbital-Theorie präsentiert. Ihr abstrahierter Schluss auf das Allgemeine aber ist unzulässig.

HAYS et al. darf aber nicht gefolgt werden, selbst wenn nur die Rohdaten betrachtet werden. Die Rohdaten-Lage ist in mehrfacher Weise nicht eindeutig, spektrale Peaks können in mehrfacher Weise gedeutet werden, alternative Mechanismen können Quasi-Periodizitäten hervorrufen (Autozyklizität). Mehr noch ist über die Real-Sedimentation (zu) wenig bekannt – dies schließt auch das Unwissen über Hiaten in der Sedimentfolge ein –; schließlich hat die stratigraphische Überlieferung Charakteristika dynamisch nichtlinearer (chaotischer) Systeme (vgl. SMITH 1994). Die A-priori-Annahme einer einfachen (linearen) Beziehung zwischen [theoretischen] Milankovitch-Zyklen, Insolation und sedimentärer Überlieferung ist spekulativ und hat angesichts der zuvor angesprochenen Dynamik (Nichtlinearität) keine Grundlage. Es scheint, als würde ein simples, künstliches „orbital-geologisches Universum“ geschaffen, um es anschließend einem einfachen, dafür konstruierten (geologischen) Test unterziehen zu können. Weder ist mit dieser Arbeit die „Astronomische Theorie der Eiszeit“ bestätigt noch ist ein Nachweis von Milankovitch-Zyklen gegeben.

#### **5.4 Mitteldevonische Sedimentfolge im Rheinischen Schiefergebirge: Versuch einer Korrelation mit theoretischen Milankovitch-Zyklen**

##### ***Titel***

HERING (1995): Milankovitch-Zyklen in mitteldevonischen Schelf-Carbonaten des Rheinischen Schiefergebirges.<sup>69</sup>

##### ***Lithostratigraphie, Untersuchungsgebiet***

Grevenstein-Formation, Bergisches Land; aufgelassener Steinbruch der Fa. Pack bei Linde, W Lindlar (GK 25 Kürten 4909).

##### ***Stratigraphisches Alter***

Givet-Stufe. Biostratigraphische Einstufung unsicher (S. 5): „keine aussagekräftigen Conodonten“ oder andere Fauna; die Einstufung erfolgt auf Basis der geologischen Gesamtsituation, insbesondere des „‘unmittelbar Liegenden der (*Spinocyrtia-*) *ascendens*-Schichten‘ des Mittleren Givet“ (nach SCHMIDT & TRUNKO 1965).

---

<sup>69</sup> Im Rahmen des IGCP-Projektes (International Geoscience Programme) 216: „Global Biological Events in Earth History.“

### **Beschreibung und Relevanz**

Gegenstand der Arbeit ist die mikro- und makrofazielle Untersuchung einer 52 m mächtigen Folge „(...) aus bituminösen, dunklen, z. T. fossilreichen Kalksteinen und Mergelkalksteinen (...), in die wiederholt fossilarme Mergelschiefer eingeschaltet sind“ (S. 7).

Die Gesteinsfolge umfasst nach HERING (S. III) die „volle Mächtigkeit der Grevenstein-Fm. des Bergischen Landes“ und wird von ihm als Ablagerung eines ‘back-reef’-ähnlichen Environments<sup>70</sup> interpretiert. HERING unterteilt das Profil in sechs Abschnitte<sup>71</sup>, die er wie folgt deutet (S. III): „Jeder Profilabschnitt stellt einen in sich abgeschlossenen Entwicklungsrhythmus dar, im dem der Einfluss von relativ hochenergetischen Ereignissen (Stürme, sturminduzierte Ereignisse, bodennahe Strömungen) zum Top eines jeden Abschnittes hin zunimmt (‘energizing upwards’), (...). Jeder Entwicklungsrhythmus eines Abschnittes ist mit der Ablagerung eines nahezu fossilfreien Mergels beendet.“ In den Profilabschnitten 2 und 3 (6,5 bis 26,5 m) sieht HERING wiederkehrende Abfolgen von Korallen- und Stromatoporen-Vergesellschaftungen, die er als biogene Rhythmen deutet; er weist 21 solcher Rhythmen aus.

Das Ziel der Untersuchung wird im Abschnitt Arbeitsmethoden genannt (S. 6): „Abschließend wurde die Dauer einzelner Sedimentationszyklen abgeschätzt und eine Korrelation mit den ‚MILANKOVITCH-Zyklen‘ versucht.“

### **Methodik: Gliederung und Zeitschätzung**

Die Dauer der Bildung der Sedimentfolge der Grevenstein-Formation im Bergischen Land (Mächtigkeit zwischen 50 und 70 m) schätzt HERING (S. 42-43) auf 500.000 bis 700.000 [radiometrische] Jahre. Diesen Wert berechnet er überschlagsmäßig aus der Zeitdauer der gesamten Givet-Stufe („nach HARLAND et al. 1989: 7 Millionen Jahre“<sup>72</sup>), der durchschnittlichen Mächtigkeit der Givet-Stufe im Bereich des Arbeitsgebietes (500-700 m) und dem Anteil der Grevenstein-Formation (1/10), wobei er – ohne es konkret auszusprechen – radiometrische Jahre Kalenderjahren gleichsetzt. Jedem Abschnitt<sup>73</sup> weist er „eine Sedimentationsdauer von 100.000 ± 17.000 Jahren“ zu, jedem Rhythmus in Abschnitt 2 und 3 eine durchschnittliche Dauer von „(...) 9.523 Jahren (21 Rhythmen in 200.000 Jahren)“.

Mit der durchschnittlichen Mächtigkeit eines Rhythmus (0,95 m) berechnet er des Weiteren eine Sedimentationsrate von „(...) rund 0,01 cm (0,00998 cm) pro Jahr bzw. 10 cm (9,98 cm) in 1.000 Jahren.“ Beispielhaft führt HERING für Rhythmus 11 (Bank 56-57) eine „rein mathematisch[e] (...) Zeitberechnung einzelner Vergesellschaftungen“ durch (Tab. 10), die er allerdings aus zahlreichen in seiner Arbeit dargestellten Gründen für nicht haltbar hält.<sup>74,75</sup>

<sup>70</sup> Ein Riffkörper wurde nicht nachgewiesen; dazu HERING (1995, 42): „Die Entstehung in einem echten ‚back-reef‘-Bereich ist trotz des Mikrofaunen/-flore-Charakters nicht anzunehmen, da sich auch in der weiteren Umgebung des Profils Steinbruch Pack kein Riffkörper nachweisen lässt. Die beschriebene Fazies ist deshalb als ‚back-reef‘-ähnliche Fazies zu bezeichnen.“

<sup>71</sup> Mit insgesamt 188 Bänken.

<sup>72</sup> Zur Klarstellung: radiometrische Jahre.

<sup>73</sup> HERING (1995, 43): „Das Profil ist in 6 Abschnitte ungefähr gleicher Sedimentationsdauer teilbar.“

<sup>74</sup> Hierzu resümiert HERING (1995, 44): „Es zeigt sich, dass solche Zeitberechnungen desto unwahrscheinlicher werden, je kürzer die betrachteten Zeitintervalle werden. Die für die Abschnitte 2 und 3 errechnete durchschnittliche Sedimentationsrate bleibt trotzdem vertretbar, da die sehr hohen Sedimentationsraten der

Vergesellschaftung (Bank 56 und 57, Rhythmus 11)	Zuweisung Dauer
<i>Stringocephalus-/Korallen-Schill</i>	0,15 m = 1500 Jahre
<i>Stromatopora</i>	0,25 m = 2500 Jahre
<i>Thamnopora</i>	0,10 m = 1000 Jahre
<i>Stromatopora</i>	0,25 m = 2500 Jahre
<i>Thamnopora</i>	0,10 m = 1000 Jahre
<i>Aulopora</i>	0,10 m = 1000 Jahre
	Summe
für einen vollständigen Rhythmus mit einer durchschnittlichen Mächtigkeit	0,95 m = 9500 Jahre

**Tab. 10** Die Problematik 9.500 „Jahre“ zu verteilen (Grevenstein-F., Bergisches Land).

HERINGS Versuch, die zeitliche Dauer seiner ausgewiesenen Rhythmen im Detail abzuschätzen. Auf Basis einer Stromatoporen-Wachstumsrate von 0,33 cm pro Jahr (1 Lamine pro Mondphase) errechnet er für eine 0,25 m dicke Stromatopore einen Zeitraum von 75 Jahren; eine um den Faktor 33 höhere Sedimentationsrate als die angenommene von rund 0,01 cm pro Jahr (siehe Textteil). Seiner Abb. 27 (rechts) kann entnommen werden, dass er abschließend für 1 Rhythmus ca. 1.000 [radiometrische] Jahre Ablagerungszeit für die Gesamtheit der Faunenvergesellschaftungen und ca. 9.000 [radiometrische] Jahre für den Mergel ansetzte.

### **Ergebnisse und Schlussfolgerungen des Autors**

HERING (S. 45ff.) korreliert „(...) die Zeitdauer von 2 Rhythmen (19.046 Jahre) mit der Dauer eines mitteldevonischen Präzessionszyklus von durchschnittlich 18.355 Jahren“<sup>76,77</sup>, indem er eine ungefähre Übereinstimmung feststellt. Der [theoretische] Präzessionszyklus hätte sich dergestalt ausgewirkt, dass jeweils im Bereich der Mitte der Einstrahlungskurve, also zweimal, gleiche Einstrahlungsbedingungen vorgelegen hätten, in welchen sich die Faunenvergesellschaftungen entwickelt hätten.<sup>78</sup> Weiter resümiert er (S. 49): „Die Lebewelt zeichnet diese MILANKOVITCH-Zyklen rhythmisch nach (...)“. Eine quantitative Einschätzung der Auswirkung des theoretischen Präzessionszyklus, z. B. auf die mittlere Jahrestemperatur, gibt HERING nicht.<sup>79</sup>

---

biogenen Komponenten durch die wesentlich niedrigeren Sedimentationsraten der Mergel und Matrix zwischen den Komponenten kompensiert wird.“

<sup>75</sup> Der Erläuterung zu seiner Abb. 27 ist zu entnehmen (HERING 1995, 50): „So benötigen die Mergersedimente zur Ablagerung sicherlich eine deutlich längere Zeit, als ein innerhalb von vielleicht wenigen Tagen durch Sturmeinwirkung aufgearbeiteter Stringocephalus-Schill-Horizont, oder eine in wenigen hundert Jahren gewachsene Stromatopora-Vergesellschaftung.“

<sup>76</sup> Vgl. BERGER et al. (1989).

<sup>77</sup> Zur Klarstellung: astronomische Jahre.

<sup>78</sup> HERING (1995, 48): „Es scheint daher am wahrscheinlichsten, dass sich die Vergesellschaftungen im Bereich der relativ konstanten Lebensbedingungen in der Mitte der Strahlungskurve (bei durchschnittlichen Einstrahlungsintensitäten) entwickelten. Nur hier fanden die Hauptcarbonatproduzenten wie Korallen und Stromatoporen gute Lebensbedingungen, so dass sie sich zu einer relativ diversen Vergesellschaftung entwickeln konnten. Das Absterben der Korallen- und Stromatoporen-Fauna und die darauffolgende Verbreitung von Stringocephalus findet zu Zeiten höherer oder niedriger Strahlungsintensitäten statt, wenn sich die relativ optimalen Lebensbedingungen auf Höhe der halben Amplitude der Einstrahlungskurve durch Änderung der Einstrahlungsintensität in Richtung auf ein Einstrahlungsmaximum oder -minimum verschlechtern.“

<sup>79</sup> HERING (1995, 49) verweist in diesem Zusammenhang auf DE BOER: „Ein Einfluss des Präzessionszyklus auf die klimatischen Verhältnisse kann von der Theorie DE BOER'S (1982) abgeleitet werden (...), derzufolge bei einer Anhebung des kalorigen Äquators, im Zusammenhang mit dem Präzessions-Zyklus, eine Störung des Gleichgewichtes der vorherrschenden Windzirkulation, Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten stattfindet. Es ist durchaus logisch anzunehmen, dass eine solche Störung sich nicht plötzlich an einem Einstrah-

Des Weiteren korreliert HERING den Top eines jeden der sechs ausgewiesenen Abschnitte, der jeweils durch eine mächtigere Mergeleinschaltung charakterisiert ist, mit einem jeweiligen Maximum des theoretischen Exzentrizitätszyklus.<sup>80</sup> Eine Zunahme des Gehaltes an Schallenschill eines jeden Profilabschnittes interpretiert er als Zunahme des Einflusses von Stürmen oder bodennahen Strömungen („energizing upwards“), die durch die „Zunahme der Effekte des Exzentrizitätszyklus“ verursacht sind.

Zusammenfassend stellt HERING fest (S. IV): „Die Dauer der Profilabschnitte, sowie die der biogenen Rhythmen, konnten mit der Periode des Exzentrizitäts- und des Präzessionszyklus (MILANKOVITCH-Zyklen) korreliert werden. Dabei wird der biogene Rhythmus durch die Klima-beeinflussenden Effekte des Präzessionszyklus, der ‚energizing upwards‘-Rhythmus durch die Klima-beeinflussenden Effekte des Exzentrizitätszyklus gesteuert.“

### **Diskussion**

Die der Sedimentfolge zugeschriebenen wiederkehrenden Veränderungen korreliert HERING (1995, 45) – aufgrund der zeitlichen Übereinstimmungen – mit Milankovitch-Zyklen: „Auffällig hingegen sind die zeitlichen Übereinstimmungen mit den Milankovitch-Zyklen.“ Andere Erklärungen gibt es ohnedies nicht, denn (S. 45): „Tellurisch<sup>81</sup> gesteuerte Prozesse, die in Zeitabständen von 10.000 oder 100.000 Jahren immer wiederkehren, sind nicht bekannt.“ HERINGS Korrelation ist eine Zuweisung.

Die Annahme gleicher Zeitabstände, sowohl für die sechs Abschnitte (der Gesamtfolge) als auch die 21 Rhythmen (Abschnitt 2 und 3), stellt HERING (S. 45) als Quasi-Tatsache dar: „Da die Veränderungen rhythmisch und in gleichen Zeitabständen erfolgen (...)“. Es ist seine methodische Grundvoraussetzung, um überhaupt eine Korrelation mit den theoretischen Milankovitch-Zyklen vornehmen zu können. Diese Annahme aber ist rein willkürlich.

Wird die Rechnung mit der aktuell ausgewiesenen Dauer der Givet-Stufe von 5,0 Millionen [radiometrischen] Jahren vorgenommen (GRADSTEIN et al. 2012; gegenüber 7,0 Millionen [radiometrischen] Jahren, s. o.), so müssten alle Zahlenwerte um 29% reduziert werden. Folglich wäre eine vermeintliche Übereinstimmung mit den theoretischen Milankovitch-Zyklen nicht mehr gegeben.

HERINGS Sedimentationsmodell (inklusive der Zyklen-Steuerung), welches einen generalistischen Charakter aufzeigt, müsste über das Arbeitsgebiet hinaus anwendbar sein. Hierüber wird aber nicht berichtet.

---

lungsminimum- oder -maximumpunkt auswirkt, sondern sich langsam, in Annäherung an diese, aufbaut. Mit zu- oder abnehmender Intensität der Sonneneinstrahlung, in Annäherung an ein Einstrahlungsminimum- oder -maximumpunkt, können somit beispielsweise Lufttemperatur, Sturmintensität, die Häufigkeit von Stürmen, die Stärke der Erwärmung oder Abkühlung des Meerwassers oder auch eine Änderung der Wassertemperatur durch Heranführen anders temperierten Meerwassers, infolge sich verlagernder Meeresströmungen, als direkte Folge der Einstrahlungsintensität angenommen werden. Die mögliche zeitliche Verzögerung einer Reaktion des Erdklimas auf sich ändernde Strahlungsintensitäten wurde hierbei nicht berücksichtigt.“

<sup>80</sup> „Die Zeitdauer je eines Profilabschnittes lässt sich mit dem 100.000 Jahres-Exzentrizitäts-Zyklus korrelieren“ (HERING 1995, 47).

<sup>81</sup> Die Erde betreffend.

Die Bankung der Kalksteine sowie der eingeschalteten Mergelkalksteine und Mergelschiefer lassen durchweg auf eine Ereignis-basierte Sedimentation schließen. Aus den weiteren Beschreibungen von HERING kann eine zeitweise Autochthonie<sup>82</sup> nicht zwingend abgeleitet werden. Im Gegensatz zur Vorstellung von HERING, der für die verschiedenen „Faunenvergesellschaftungen“ Lebensraummodelle<sup>83</sup> konstruiert, handelt es sich wahrscheinlich eher um verhältnismäßig rasche Schüttungsereignisse unterschiedlicher hydrodynamischer Energie (chaotische Sedimentation), also vielmehr um „Sedimentationsvergesellschaftungen“, sodass die Bildungsdauer einer Bank nicht in Größenordnungen im Bereich mehrerer Tausend (Real-) Jahre zu suchen, sondern um Größenordnungen niedriger anzusetzen ist.<sup>84</sup>

### **Systematik**

Zuweisung.

### **Fazit**

Wichtige Teilaspekte der Untersuchung – die Gliederung der Sedimentfolge und der Ausweis von Rhythmen im Kontext des radiometrischen Altersrahmens – scheinen zielgerichtet auf eine Korrelation mit theoretischen Milankovitch-Zyklen durchgeführt worden zu sein. Die Plausibilität der Annahmen HERINGS sind mehr als fraglich, insbesondere die Vorstellungen zur Sedimentation und ihrer womöglich realen Dauer. Der Nachweis von Milankovitch-Zyklen ist von HERING nicht erbracht worden, insofern ist der Titel der Arbeit „Milankovitch-Zyklen in (...)“ irreführend.

## **5.5 Das Rossello-Komposit-Profil in Sizilien: Konstruktion einer astronomischen Zeitskala für das Pliozän**

### **Titel**

LOURENS et al. (1996): Evaluation of the Plio-Pleistocene astronomical timescale. [*Evaluierung der plio-pleistozänen astronomischen Zeitskala*].

### **Lithostratigraphie, Untersuchungsgebiet**

Trubi- und (Monte) Narbone-Formation; Teile der Profile Eraclea Minoa, Punta di Maiata, Punta Grande und Punta Piccola bilden zusammen das Rossello-Kompositprofil (Sizilien), Maximaldistanz zwischen den Lokalitäten etwa 25 km. Die untersuchten Profile in Kalabrien sowie die holozänen Tiefseesedimentkerne werden nicht berücksichtigt.

---

<sup>82</sup> Z.B. *Aulopora* und *Thamnopora*, z. T. in Lebendstellung (S. 34); Korallenrasen in Lebendstellung (S. 39). Die vermeintliche Lebendstellung kann auch allochthon verursacht sein.

<sup>83</sup> Zur mikrofaziellen Ansprache räumt HERING (1995, 30) kritisch ein: „FLÜGEL (1978) weist darauf hin, dass es sich bei dieser Einteilung um z. T. stark abstrahierte Denkmodelle handelt.“

<sup>84</sup> HERING erkennt, dass (hochauflösende) Detail-Berechnungen zur Sedimentationsrate zu inkonsistenten Werten führen. Statt diese Inkonsistenzen weiter zu hinterfragen, bricht er die Diskussion ab. Siehe Fußnote 74.

## **Stratigraphisches Alter**

Pliozän.

### **Beschreibung und Relevanz**

Ziel der Arbeit von LOURENS et al.<sup>85</sup> war die Evaluierung der Zeitskala von HILGEN (1991a, 1991b) für das Pliozän und Unter-Pleistozän. Dafür wurden a) ein Vergleich der sedimentären Zyklenmuster mit unterschiedlichen Modell-Zeitreihen der [theoretischen] Insolation (Sommer 65° N) sowie b) kreuzspektrale Vergleiche zwischen den Komponenten der Insulationskurve und den hochauflösenden paläoklimatischen Aufzeichnungen unternommen.

Die auffälligen karbonatischen Wechselfolgen an den Steilküsten am und in der Nähe des Capo Rossello im Süden Siziliens werden als (rhythmische) Karbonatzyklen beschrieben bzw. interpretiert. Im unteren Teil, der Trubi-Formation, dominieren Zyklen mit einem grau-weiß-beige-weißen<sup>86</sup> Lagenaufbau (Abb. 17 und Abb. 18); die grauen und beigeen Lagen sind kalkärmer und weniger erhärtet.<sup>87</sup> Im basalen Bereich der überlagernden Narbone-Formation sind in die grauen Lagen Organik-reiche, braune Lagen eingeschaltet, die als (fossile) Sapropel<sup>88</sup> interpretiert werden.

HILGEN (1987) zufolge sind die sedimentären Rhythmen<sup>89</sup> in erster Linie auf die variierende Verdünnung der Karbonat-Komponente durch terrigenes Material zurückzuführen. Das wiederum sei durch periodische Fluktuationen von Niederschlag und oberirdischem Abfluss verursacht worden. Die Periodizität deutet – so HILGEN weiter – „(...) auf einen Zusammenhang mit den astronomischen Zyklen der Präzession (21 ka)<sup>90</sup> und Exzentrizität (100 und 400 ka)“;

<sup>85</sup> Zu den Co-Autoren gehört auch HILGEN selbst.

<sup>86</sup> Dies entspricht dem „idealisierten“ Rhythmit. Es treten zahlreiche Variationen auf mit schwach („poorly developed“) oder nicht ausgebildeten („completely lack sedimentary expression“, „absent“) grauen Lagen (z. B. Zyklen 74-78) oder beigeen Lagen (z. B. Zyklen 3, 5, 7; 30, 32; 35, 37, 39, 41; 58; 72, 74). Darüber hinaus werden fehlende Sediment-Zyklen postuliert (und orbital-technisch begründet): Der Ausweis sogenannter Komposit-Zyklen, einem Rhythmit, der zwei Orbital-Zyklen entsprechen soll (z. B. Zyklen-Gruppe 110-113, „containing an extra cycle that lacks sedimentary expression“, Zyklus 59). Vgl. hierzu LOURENS et al. (1996, 400). Für die gesamte pliozäne Abfolge, die HILGEN (1991b) in 119 Rhythmite (Zyklen) unterteilt, fehlen acht graue Lagen.

<sup>87</sup> DE VISSER (1989) fasst eine Wechselfolge aus einer grauen Lage (A) und einer weißen, stärker erhärteten Lage (B), in welche eine beige, weniger erhärtete Lage (C) eingeschaltet ist, zu einem durchschnittlich etwa 1 m dicken, mergeligen Rhythmit (ABCB) zusammen. Die Rhythmite entstanden möglicherweise – so DE VISSER weiter – durch eine alternierende Prädominanz aus einer erhöhten Verdünnung (der Karbonatkomponente) durch den Eintrag der Flüsse mit terrigenem Material (grau) und abnehmender Karbonatproduktion im Oberflächenwasser (beige). Dabei sollen die grauen Lagen mit Perioden erhöhter lokaler Ausflüsse, höherer Wassertemperaturen und Produktivität korrespondieren, während die beigeen Lagen mehr aride und kühlere Konditionen und niedrigere Oberflächenwasserproduktivität und stärkere, häufigere Staub-geladene südliche Winde signalisieren sollen; die weißen Lagen schließlich würden scheinbar intermediäre klimatische und umgebungsbedingte Konditionen reflektieren. Der Kalziumkarbonatgehalt variiert allerdings nur um etwa 10 %: beige Lage ( $\emptyset \pm 65\%$ ), beige Lage ( $\emptyset \pm 70\%$ ) und weiße Lage ( $\emptyset \pm 75\%$ ). Basis: vier beprobte Rhythmite (16 Proben) der Trubi-Formation, Profil am Punta di Maiata (mit ca. 50 Rhythmiten).

<sup>88</sup> Faulschlamm.

<sup>89</sup> HILGEN (1987, seine Fig. 6) korreliert Teile der „Rossello“-Abfolge Rhythmit für Rhythmit mit der 300 km (!) entfernten Singa-Abfolge in Kalabrien. Dort sind die Rhythmite als einfache grau-beige oder grau-weiße Duplets ausgebildet.

<sup>90</sup> Bereits von ZUIDERVELD et al. (1986) geäußert (für den Trubi-Teil des Singa-Profiles in Kalabrien).

die Interpolation der Rhythmite erlaube „(...) eine absolute Kalibrierung des gesamten mediterranen Pliozäns.“



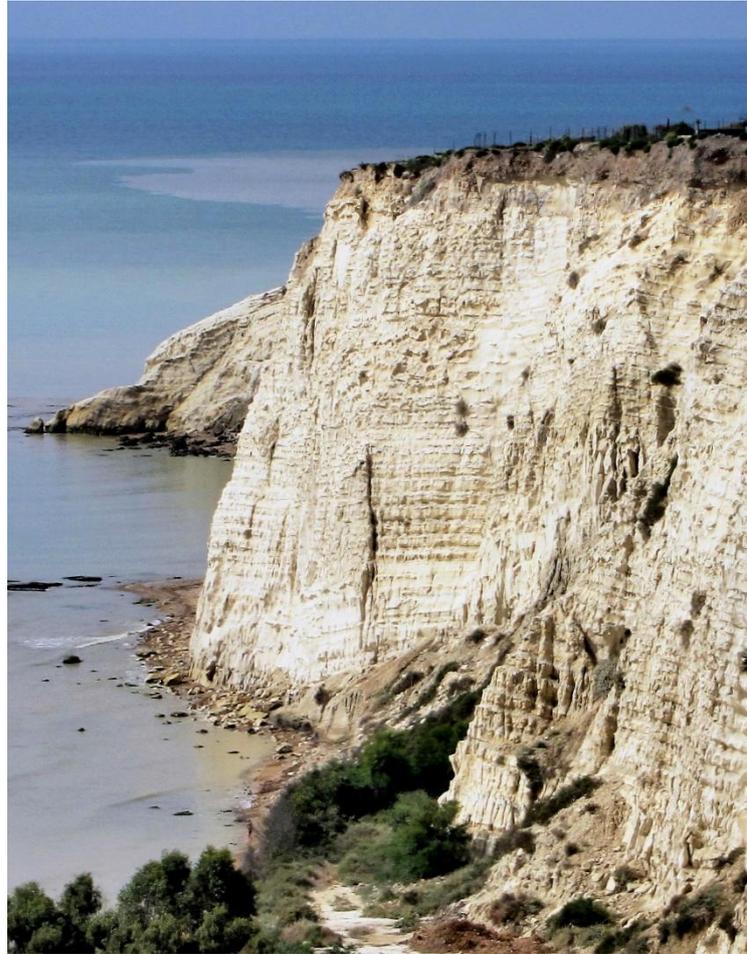
**Abb. 17** Karbonatische Wechselfolge am Punta di Maiata (Sizilien).

Trubi-Formation (Pliozän); ein Großteil der Sedimentfolge (etwa 40 m) bildet einen Teil des Rossello-Kompositprofils. Die Wechselfolge wird zyκλοstratigraphisch interpretiert. Foto: © Birute Vijeikiene – fotolia.com.

Die stratigraphische Bedeutung des Rossello-Kompositprofils (LANGEREIS & HILGEN 1991) wird dadurch bekräftigt, dass an zwei Abschnitten daraus stratigraphische Stufen formal (GSSP) etabliert wurden: die Basis der Zancleum-Stufe<sup>91</sup> (VAN COUVERING et al. 2000, Eraclea Minoa) und die Basis der Piacenzium-Stufe<sup>92</sup> (CASTRADORI et al. 1998, Punta Piccola).<sup>93</sup>

<sup>91</sup> Ausnahmsweise ist hier eine Grenzziehung in einem Bereich „dramatisch stratigraphischer Diskontinuität“ von der ICS befürwortet und von der IUGS ratifiziert worden. Die Basis bilden die marinen, weißen Mergel der Trubi-Formation, die messerscharf die fluviolakustrinen, dunkelbraunen Sande und Mergel der Arenazzolo-Einheit der Messinium-Stufe überlagern (VAN COUVERING et al. 2000, 180). Letztere sind möglicherweise zuvor teilweise erodiert worden. Der scharfe Kontakt markiert das abrupte Ende der sog. Messinischen Salinitätskrise und die katastrophische Flutung des Mittelmeers mit atlantischem Meerwasser über die heutige Gibraltar-Straße (GARCIA-CASTELLANOS et al. 2009). Der krasse Wechsel ist im gesamten Mittelmeerraum beobachtbar und wird als isochrones Ereignis angesehen. Die Messinium/Zancleum-Grenze markiert ebenfalls die Miozän/Pliozän-Grenze (5,33 Millionen [radiometrische] Jahre).

<sup>92</sup> Die Basis ist zyκλοstratigraphisch definiert. Sie beginnt mit der beigen Lage des Rhythmit (Karbonatzyklus) 77 (HILGEN 1991b), MPRS 347 (nunmehr MPRC 346; HILGEN et al. 2012, 934), 3,60 Millionen [radiometrische] Jahre und liegt unmittelbar unterhalb der Gilbert/Gauss-Grenze. Im Wesentlichen ist das Pliozän magnetostratigraphisch in Gilbert-Chron (Zancleum-Stufe) und Gauss-Chron (Piacenzium-Stufe) unterteilt. MPRS: Mediterranean Precession Related Sapropel; MPRC: Mediterranean Precession Related Cycle (Durchnummerierung der [theoretischen] Präzessionszyklen bzw. -halbzyklen).



**Abb. 18** Karbonatische Wechselfolge, Steilküste Eraclea Minoa (Sizilien). Trubi-Formation (Pliozän); die formale Miozän/Pliozäne-Grenze (GSSP) befindet sich hier nahe der Kliffbasis. Die Abfolge bildet die Basis (etwa 28 m) des Rossello-Kompositprofils. Foto: Hein56didden (Wikimedia Commons).

### **Methodik I: Untersuchungsgegenstand und Messreihen**

Generierung der Wertereihe (jeweils Variable zu Profilmeter):

- Oberflächentemperatur (sea surface temperature): SST (basierend auf ein Verhältnis planktonischer Foraminiferen, Warmwasserspezies zu Kalt- und Warmwasserspezies); 502 Proben für den pliozänen Teil. Es liegt kein gleichmäßiges Proben-Intervall vor; es wird angenommen, dass für jede Lage mittig eine Probe entnommen wurde.
- Geochemische Analyse:  $\delta^{18}\text{O}$  (an Foraminiferen der planktonischen Spezies *Globigerinoides obliquus*).

Datenverfügbarkeit (öffentlich): medisect-tab.txt; Datenverwendung durch den Verfasser (s. u.).

<sup>93</sup> Die Basis der folgenden Gelasium-Stufe ist formal am Monte San Nicola, nahe Gela, etwa 75 km E des Capo Rossello festgelegt worden (Rio et al. 1998). Die Grenze Piacenzium/Gelasium ist (zyklostratigraphisch) definiert mit der Basis der Mergellage, die den „Sapropel“ überlagert, der dem Zyklus MPRS 250 ([theoretischer] Präzessionshalbzyklus) zugeordnet wird; die Gauss/Matuyama-Grenze befindet sich etwa 1 m unterhalb der Basis. Die Basis korreliert (zeit-stratigraphisch) mit dem Rhythmit (Zyklus) 119 (A5) des Rossello-Kompositprofils (ebenfalls MPRS 250). Die gesamte, 161 m mächtige Sedimentfolge am Monte San Nicola umfasst die marinen Isotopenstufen (MIS) 116 bis 56; die Gelasium-Stufe umfasst einen Anteil von etwa 80 m.

### **Methodik II: Tuning**

Tuning-Zielkurven: Ber90 (LASKAR 1988, BERGER & LOUTRE 1991), La90 (LASKAR 1990) und QTD90 (QUINN et al. 1991).

### **Methodik III: Programme und Analysetechnik**

CLEAN-Programm (ROBERTS et al. 1987).

### **Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Autoren**

Im Vergleich zu HILGEN (1991a, 1991b), der 119 Rhythmite (Karbonatzyklen) 130 [theoretischen] Präzessionszyklen zugeordnet hatte, weisen LOURENS et al. (1996) der gleichen Anzahl Rhythmite aufgrund des besser passenden, korrigierten Orbitalmodells La90 131 [theoretische] Präzessionszyklen zu. Dies gilt entsprechend für die [theoretischen] Präzessionshalbzyklen<sup>94</sup>, 260 zu 262 (Faktor 2).

Die getunten Proxy-Reihen ( $\delta^{18}\text{O}$ , SST) stimmten signifikant mit der Insolationskurve (65° N Sommer) überein. An zwei Beispielen wird gezeigt, dass die kreuzspektrale Kohärenz zwischen getunter Proxy-Reihe und Insolationskurve hoch ist (auf oder über dem Niveau des Signifikanz-Levels von 5 %).

LOURENS et al. (1996, 412) schlussfolgern u. a., dass sedimentäre Zyklenmuster im Mittelmeerraum deutlich die Beeinflussung sowohl des Präzessionszyklus als auch des Obliquitätszyklus der Erdumlaufbahn widerspiegeln.<sup>95</sup>

### **Diskussion**

Die (kleine) Korrektur von LOURENS et al. war der (vorerst) letzte Schritt zur Feinkalibrierung des Pliozäns mit theoretischen Milankovitch-Zyklen; diese pliozäne Zeitskala hat bis heute Bestand (GTS2012). Die Tuning-Maßnahmen begannen 1987-1989, und was zunächst als eine „gröbere“ Abweichung zur radiometrischen Datierung der Miozän/Pleistozän-Grenze galt (BERGGREN 1985, 5,2 Millionen [radiometrische] Jahre, versus ZIJDERVELD et al. 1986 und HILGEN 1987, etwa 4,84 Millionen [radiometrische] Jahre), hat sich in der Folge mit 5,33 Millionen [radiometrischen] Jahren (LOURENS et al. 1996) nahe dem ursprünglichen Werte „eingependelt“ (Tab. 11). Insofern bestätigt sich, dass das Tuning als Feinabstimmung der bestehenden (radiometrisch begründeten) Zeitskala (vgl. Abschnitt 4.4) Anwendung findet.

Methodisch haben die Autoren eine Zuweisung vollzogen. Die „durchschnittliche Bildungszeit“ der ausgewiesenen Rhythmite (Zyklen) passt auf Basis ihrer ungefähren Anzahl und unter Zugrundelegung des radiometrischen Altersrahmens grob gerechnet (und einfach in Beziehung gesetzt) zur Periodendauer des theoretischen Präzessionszyklus, nicht aber zu jener des theoretischen Obliquitäts- oder Exzentrizitätszyklus. Bei angenommenen 3,2 Milli-

<sup>94</sup> Rückgerechnet von der Gegenwart (0) bis zur Basis des Pliozäns; hier [theoretische] Präzessionshalbzyklen (Nr.) 250 bis 508 (Zuweisung i. d. R. jeweils mittig), d. h. rechnerisch 249 bis 509, entspricht einer Anzahl von 260.

<sup>95</sup> „Sedimentary cycle patterns in the Mediterranean clearly reflect the interference of the precession and obliquity cycles of the Earth's orbit“ (LOURENS et al. 1996).

onen [radiometrischen] Jahren und 161 Rhythmiten (HILGEN 1987<sup>96</sup>, siehe Tab. 11) ergibt sich rechnerisch eine durchschnittliche Periode von 19.900 [radiometrischen] Jahren.<sup>97</sup> Abhängig vom orbitalen Modell werden, damit die Zuweisung/Rechnung im Detail passt, unklare Zyklen hinzugerechnet (HILGEN & LANGEREIS 1989) oder Komposit-Zyklen, die zwei Orbitalzyklen entsprechen sollen, und/oder einfach in der Sedimentüberlieferung fehlende Orbitalzyklen definiert bzw. kreiert (HILGEN 1991b, LOURENS et al. 1996). So lässt sich die Abfolge quasi beliebig auf eine Modell-definierte Anzahl Orbitalzyklen „zuschneiden“. Zuletzt sind es 119 Rhythmite (Zyklen), die 131 [theoretischen] Präzessionszyklen zugewiesen werden.

Paläomagnetische Ereignisse/ stratigraphische Grenzen	Alter [Mio. radiometr. Jahre]			Zählung Rhyth- mite (3)	Alter [Mio. radiometrische Jahre]			
	Berggren 1985	Hilgen 1987 (1)	Hilgen & Langereis 1989 (2)		Shakle- ton 1990	Hilgen 1991a	Hilgen 1991b	Lourens et al. 1996
Matuyama/Bruhnes-Grenze	0,73				0,78	-		
Pliozän/Pleistozän-Grenze (alt)	1,64	1,64		(161)		1,81		
Olduvai (Basis)	1,88				1,95	1,95 (5)		
Gauss/Matuyama-Grenze	2,47			119	2,60	2,59/ 2,62 (6)	2,593	2,582
Kaena (Top)	2,92		2,84	103	-	3,02 (7)	3,04	3,032
Gilbert/Gauss-Grenze	3,40		3,40 (4)	77		[3,58]	3,58	3,596
Thvera (Basis)	4,77		5,08	5		[5,26]	5,23	5,236
Miozän/Pliozän-Grenze	5,20	4,84		0			5,32	5,330

**Tab. 11** Zeitkalibrierung des Pliozäns.

Von BERGGREN (1985) bis LOURENS et al. (1996); Entwicklung zu einer zyклоstratigraphischen Feinkalibrierung im radiometrischen Altersrahmen, Diskussion siehe Textteil. Erläuterungen: (1) HILGEN (1987) errechnet für 161 Rhythmite eine  $\emptyset$  Bildungsdauer von 19,9 k[r]a. (2) HILGEN & LANGEREIS (1989) feinkalibrieren den Abschnitt Thvera-Ereignis (Basis) bis Kaena-Ereignis (Top) mit 98 Zyklen, denen sie jeweils die Dauer des [theoretischen] Präzessionszyklus, 23 k[a]a, zuweisen. (3) HILGEN (1987). (4) Ankerpunkt für ihre Chronologie war die Gilbert/Gauss-Grenze, übernommen von BERGGREN (1985). (5) HILGEN (1991a) konstruiert (als neuen Ankerpunkt) ein zu SHAKLETON (1990) konformes Datum für die Basis des Olduvai-Ereignisses: durch Zuweisung eines (passenden) [theoretischen] Exzentrizitätsmaximums (astronomisches Modell BER90, BERGER & LOUTRE 1991) zu einer Abfolge von vier Sapropelen (b-e) und eines Feintunings über die Zuweisung der vier [theoretischen] Präzessionsminima zu den Sapropelen. (6) Ein ähnliches Prozedere wie unter ‚5‘ erfolgt für dieses Ereignis, um hier ebenfalls mit SHAKLETON (1990) „gleichzuziehen“. (7) Auf Basis der Neuverankerung erhält HILGEN (1991a) im Vergleich zu HILGEN & LANGEREIS (1989) für die paläomagnetischen Ereignisse um 180 k[r]a höhere radiometrische Alter.

Die von LOURENS et al. ausgewiesenen Ergebnisse der Spektralanalyse beziehen sich auf die bereits getunten Zeitreihen. Die zwei Varianzspektren zeigen (ihre Fig. 8, La90, ohne Angabe der Signifikanz-Level) für den Abschnitt 4,734-5,320 Millionen [radiometrische] Jahre unterschiedlich deutliche Peaks mit Perioden im Frequenzbereich von [theoretischer] Obliquität (41 k[a]a) und Präzession (23/19 k[a]a); die Lomb-Periodogramme des Verfassers

<sup>96</sup> „As the Pliocene boundaries have been reliably dated at 4,84 (ZUIDERVELD et al. 1986) and 1,64 Ma. (AGUIRRE & PASANI 1985), this amounts to a mean duration of 19,9 ka. (...)“ (HILGEN 1987).

<sup>97</sup> Werden die aktuellen 2,7 Millionen [radiometrische] Jahre (Pliozän, neu) überschlägig in 100-150 Einheiten aufgeteilt (segmentiert), ergibt sich eine rechnerische Dauer für jede Einheit von 18.000 bis 27.000 [radiometrischen] Jahren. Aufgrund des radiometrischen Altersrahmens kommt für Zyκλοstratigraphen nur eine Zuweisung zum theoretischen Präzessionszyklus in Frage.

(Abb. 19 und Abb. 20) zeigen ein im Verhältnis ähnliches Ergebnis. Erwartungsgemäß wird eine auf die [theoretische] Präzession getunte Reihe ein Spektrum mit mehr oder weniger deutlichen Peaks in diesem Frequenzbereich ausweisen; dies gilt analog auch für eine auf die [theoretische] Obliquität getunte Reihe (hier untergeordnet). Der signifikant hohe Kohärenzwert der kreuzspektralen Analyse – der Vergleich der getunten Zeitreihe mit der Zielkurve (Zielzeitreihe) – besagt lediglich etwas über die Tuning-Güte aus, also inwieweit durch das Tuning eine Annäherung (Phasenübereinstimmung) an die Zielkurve erreicht wurde.

Weder die beschriebene Zuweisung noch das Tuning-Ergebnis sind Nachweise für Milankovitch-Zyklen. Die Validität der Astronomischen Zeitskala (für diesen pliozänen Teil) kann nicht damit begründet werden, dass eine signifikante Kohärenz zwischen den „astronomisch-bezogenen Komponenten in den klimatischen Proxies und den Orbital-Oszillationen“ gefunden wurde.<sup>98</sup> Das ist ein Zirkelschluss; die Proxy-Reihen wurden zuvor – wie oben dargestellt – entsprechend getunt. Dennoch wird die Milankovitch-Theorie in diesem Zusammenhang als Tatsache dargestellt, so z. B. von GRADSTEIN & OGG (2012, 35, Fig. 2.3) in *The Geologic Time Scale 2012*, die von „grundlegend Präzessions-kontrollierten sedimentären Zyklen“ schreiben.<sup>99</sup>

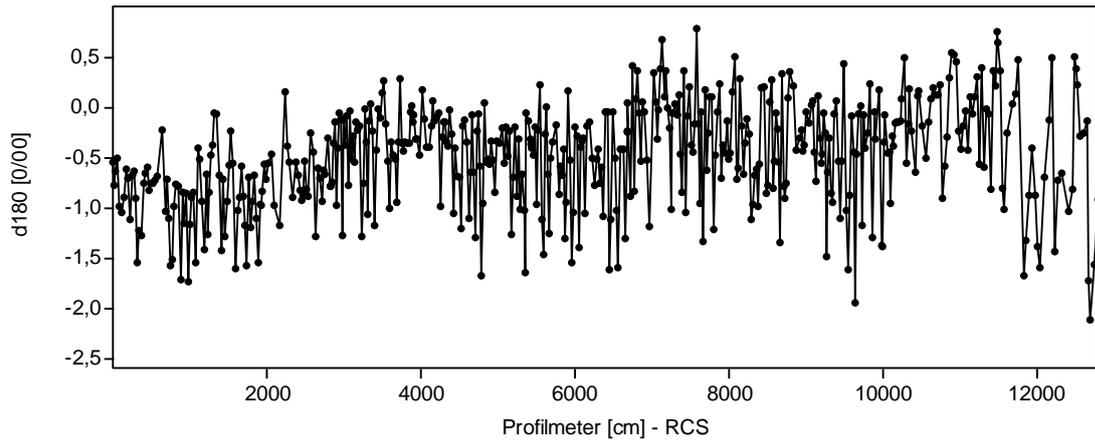
Schließlich ist die Vorstellung zur Sedimentation mehr als fragwürdig. Eine simple Steuerung durch „periodische Fluktuationen von Niederschlag“ (s. o.) und folglich eine kontinuierliche, möglicherweise leicht variierende Partikel-für-Partikel-Sedimentation ist in dem ehemals hochdynamischen, tektonisch-aktiven Mittelmeerraum unwahrscheinlich. Beispielsweise sind die Auswirkungen der katastrophischen Flutung des Mittelmeers (CASTELLANO-GARCIA et al. 2009) auf die Sedimentation bisher nicht ausreichend bedacht. Die Basis der Abfolge (gleichermaßen die Basis der Zanclesium-Stufe und des Pliozäns) wird als ein beckenweiter isochroner Horizont betrachtet, der „(...) während der Wiederauffüllung des hauptsächlich Beckens generiert wurde“ (VAN COUVERING 2000, 182). Was aber waren die weiteren Auswirkungen, als (nur) die Ausbildung eines messerscharfen Kontaktes? Wo (bzw. was) sind die Sedimente, die unmittelbar oder mittelbar dieser katastrophalen Flutung zuzurechnen sind?

## **Systematik**

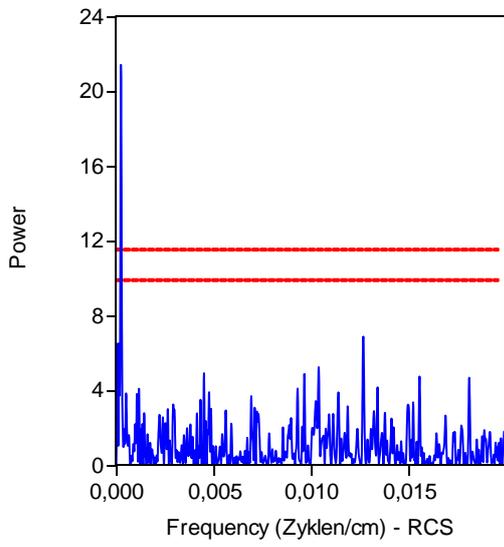
Zuweisung, Tuning.

<sup>98</sup> Der Originaltext im Zusammenhang (LOURENS et al. 1996, 391): „The astronomical (polarity) timescale of HILGEN (1991a, b) was based on the correlation of sapropel and carbonate cycle patterns to the precessional time series of astronomical solution Ber90. The late Pliocene part of this timescale has been evaluated (HILGEN et al. 1993), and the results essentially confirmed the validity of this timescale. Significant coherence was found between the astronomically related components in the climatic proxies and the orbital oscillations (...)”.

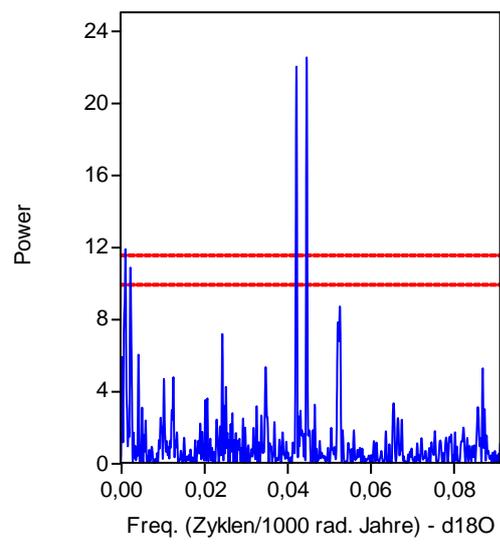
<sup>99</sup> Beschreibung zu Ihrer Fig. 2.3.: „The Rossello Composite Section (RSC, Sicily, Italy) is a prime example of the modified unit stratotype approach showing the orbital tuning of the basic precession-controlled sedimentary cycles and the resulting astronomical time scale with (...)”.



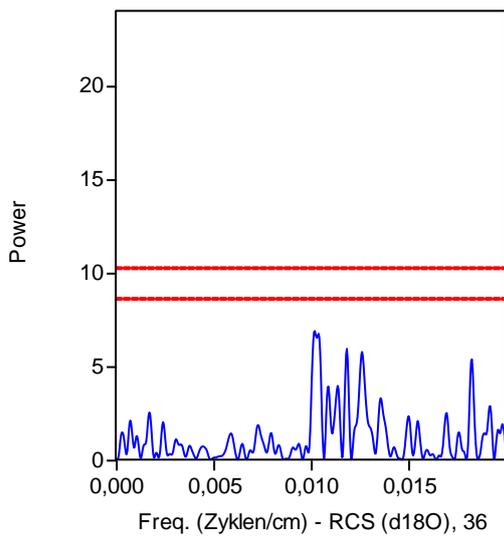
a)



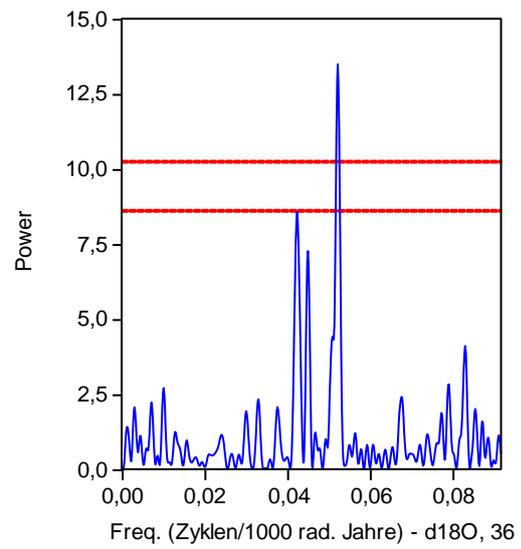
b)



c)



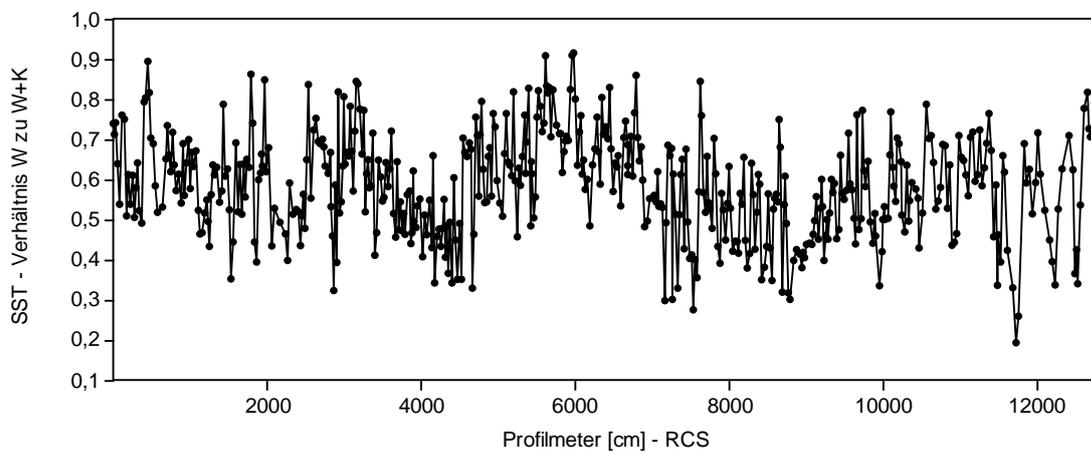
d)



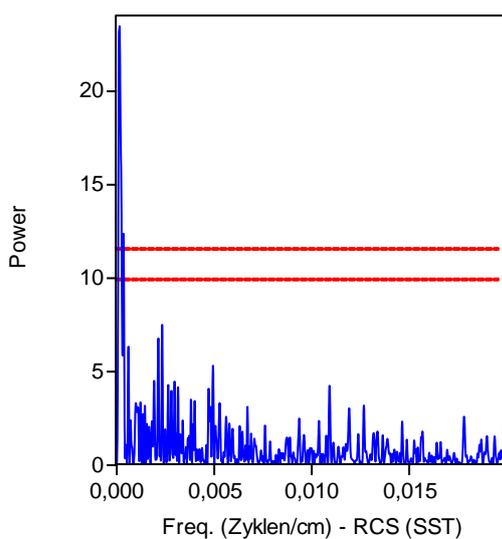
e)

**Abb. 19** Spektrale Analyse der  $\delta^{18}\text{O}$ -Reihen des Rossello-Kompositprofils (Sizilien).

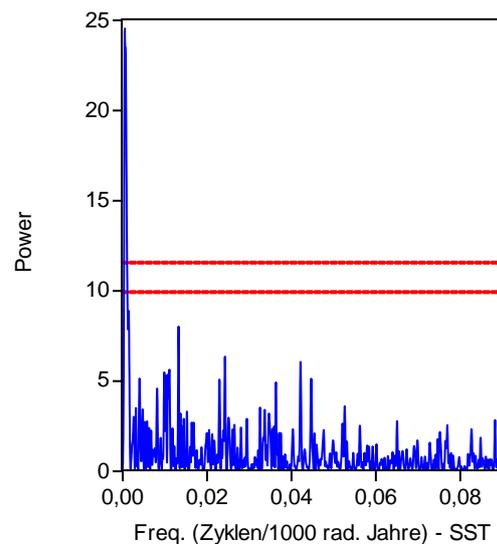
a)  $\delta^{18}\text{O}$ -Reihe, Punkt-/Liniendarstellung vom Liegenden (0 m) zum Hangenden (128 m),  $n = 502$ . b) Lomb-Periodogramm der  $\delta^{18}\text{O}$ -Wertereihe (Rohdaten, Gesamtprofil): keine signifikanten Sedimentzyklen, vom irrelevanten Peak bei 0,0002639 Zyklen/cm (entspricht einer Periode von etwa 38 m) abgesehen. Der energiereichste Peak unterhalb der Signifikanz-Level bei 0,012695 Zyklen/cm entspricht einer Periode von etwa 79 cm. c) Lomb-Periodogramm der  $\delta^{18}\text{O}$ -Zeitreihe (zeitkalibriert, auf die [theoretische] Präzession getunt; Gesamtprofil): signifikante Peaks bei 0,04239/0,04476 Zyklen/k[r]a (entsprechen Perioden von 23,6/22,3 k[r]a) sowie benachbarte Peaks unterhalb der Signifikanz-Level bei 0,02447/0,05277 Zyklen/k[r]a (entsprechen Perioden von 40,9/19,0 k[r]a). d) Lomb-Periodogramm der  $\delta^{18}\text{O}$ -Wertereihe (Rohdaten für den Abschnitt 36-68 m, nur Punta di Maiata): keine signifikanten Sedimentzyklen. Eine Häufung insignifikanter Peaks unterhalb der Signifikanz-Level tritt bei etwa 0,010 bis 0,014 Zyklen/cm auf (entspricht Perioden von etwa 70 bis 100 cm). e) Lomb-Periodogramm der  $\delta^{18}\text{O}$ -Zeitreihe (zeitkalibriert, auf die [theoretische] Präzession getunt; Abschnitt 36-68 m, nur Punta di Maiata): signifikanter Peak bei 0,05226 Zyklen/k[r]a (entspricht einer Periode von 19,0 k[r]a) sowie zwei deutliche Peaks unterhalb der Signifikanz-Level bei 0,04243/0,04505 Zyklen/k[r]a (entsprechen Perioden von 23,6/22,2 k[r]a). – Erwartungsgemäß zeigt die auf die [theoretische] Präzession (und untergeordnet auf die Obliquität) getunte Reihe ein Varianzspektrum mit deutlichen Peaks in diesem Frequenzbereich. Die Rohdaten-Spektren zeigen diese Peaks nicht. Datei: medisect-tab.txt (Ausschnitt 0-128 m); rote Linien: Signifikanz-Level 95/99% ( $\alpha = 0,05/0,01$ ).



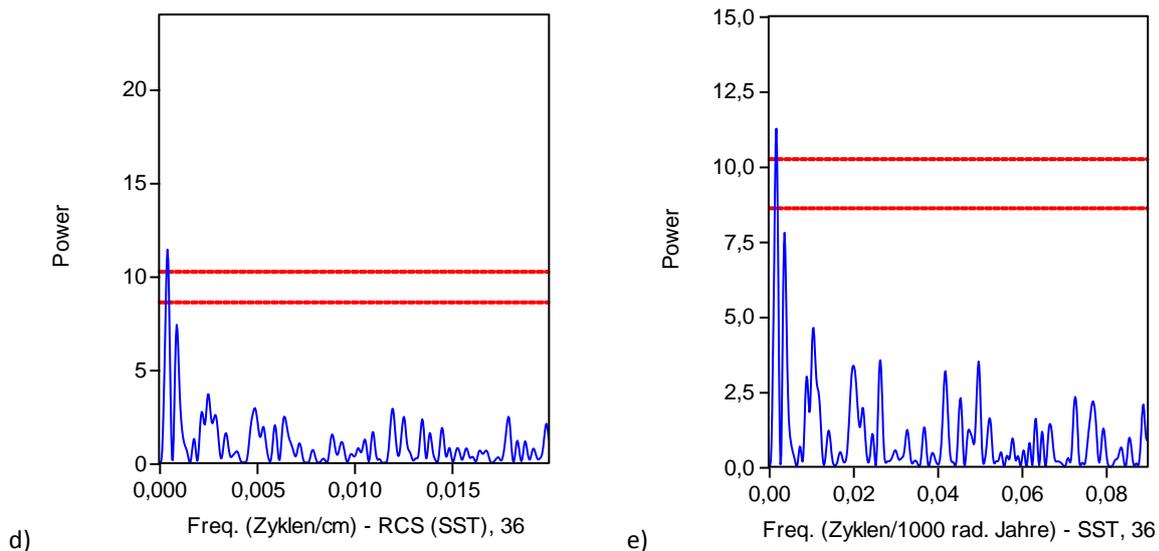
a)



b)



c)



**Abb. 20** Spektrale Analyse der SST-Reihen des Rossello-Kompositprofils (Sizilien).

a) SST-Reihe, Punkt-/Liniendarstellung vom Liegenden (0 m) zum Hangenden (128 m),  $n = 502$ . b) Lomb-Periodogramm der SST-Reihe (Rohdaten, Gesamtprofil): keine signifikanten Sedimentzyklen, vom irrelevanten Peak bei 0,0001759 Zyklen/cm (entspricht einer Periode von etwa 57 m) abgesehen. Die energiereichsten Peaks unterhalb der Signifikanz-Level bei 0,002179/0,004984/0,01096 Zyklen/cm entsprechen Perioden von 460/201/91 cm. c) Lomb-Periodogramm der SST-Reihe (zeitkalibriert, auf die [theoretische] Präzession getunt, Gesamtprofil): keine signifikanten Peaks; Peaks unterhalb der Signifikanz-Level bei 0,01364/0,02447/0,04185/0,04490/0,05286 Zyklen/k[r]a (entsprechen Perioden von 74,3/40,9/23,9/22,3/18,9 k[r]a). d) Lomb-Periodogramm (Rohdaten für den Abschnitt 36-68 m, nur Punta di Maiata): keine signifikanten Sedimentzyklen, vom irrelevanten Peak bei 0,0004302 Zyklen/cm (entspricht einer Periode von etwa 23 m) abgesehen. e) Lomb-Periodogramm (zeitkalibriert, auf die [theoretische] Präzession getunt; Abschnitt 36-68 m, nur Punta di Maiata): abgesehen vom irrelevanten Peak bei 0,001802 Zyklen/k[r]a (entspricht einer Periode von 847 k[r]a) zahlreiche energiereichere Peaks unterhalb der Signifikanz-Level: 0,01065/0,02015/0,02654/0,04194/0,0498 Zyklen/k[r]a (entsprechen Perioden von 93,9/49,6/37,7/23,8/20,0 k[r]a). – Das Tuning auf die [theoretische] Präzession (und untergeordnet Obliquität) hat für die SST-Reihe keine signifikanten Peaks erzeugt, dennoch ist unter den insignifikanten Peaks auch der Präzessions- und Obliquitäts-Frequenzbereich vertreten. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von LOURENS et al. (1996), die beim Vergleich der Spektren der getunten Proxy-Reihen mit dem Spektrum der Insolation (Kreuzkorrelation, ihre Fig. 8, La90) eine höhere Übereinstimmung für die  $\delta^{18}\text{O}$ -Reihe gegenüber der SST-Reihe ausweisen. Die Kreuzkorrelation besagt lediglich etwas über die Tuning-Güte, das Maß der Phasenübereinstimmung, aus. Datei: medisect-tab.txt (LOURENS et al. 1996, Ausschnitt 0-128 m); rote Linien: Signifikanz-Level 95/99% ( $\alpha = 0,05/0,01$ ).

### Fazit

LOURENS et al. (1996) haben die zyκλοstratigraphische Methodik konsequent auf die Sedimentfolgen des Rossello-Kompositprofils (Sizilien) angewendet. Die rhythmische Folge gilt als „lithologisches Template für den pliozänen Teil“<sup>100</sup> der Astronomischen Zeitskala; ihrer Validität liegt aber ein Zirkelschluss zugrunde. Mit ihrer Vorgehensweise der Zuweisung und des Tunings haben sie Milankovitch-Zyklen nicht nachgewiesen.

<sup>100</sup> Nach VAN COUVERING et al. (2000, 179).

## 5.6 Datierung des Wostok-Eiskerns: Imprägnation mit Milankovitch-Periodizitäten

### **Titel**

PETIT et al. (1999): Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica. [*Klima und atmosphärische Geschichte der vergangenen 420.000 Jahre vom Wostok-Eiskern, Antarktis*].

### **Lithostratigraphie, Untersuchungsgebiet**

Nicht angewendet (Eis, klimatostratigraphisch gegliedert); Komposit-Eisbohrkern der Wostok-Station, Ost-Antarktis.

### **Stratigraphisches Alter**

(Holozän), Spätquartär.

### **Beschreibung und Relevanz**

Die 1998 abgeschlossene Kernbohrung in die antarktische Eisdecke erreichte eine Tiefe von 3.623 m; sie wurde etwa 120 m über dem subglazialen Wostoksee gezielt eingestellt (Tab. 12). An dem Wostok-Eiskern wurden, wie bei anderen Eiskernen auch, zahlreiche physikochemische Reihenmessungen vorgenommen. Die markantesten, den kompletten Eiskern beschreibenden Signaturen mit der Tiefe sind das Wasserstoffisotopenprofil ( $\delta D$ ) sowie das Sauerstoffisotopenprofil ( $\delta^{18}O$ ).

Zur Erstellung ihrer Wostok-Eiskernchronologie GT4<sup>101</sup> korrelierten PETIT et al. insbesondere das  $\delta D$ -Profil mit einer orbital-getunten Sauerstoffisotopen-Referenzzeitskala.

Kennzahlen	Wostok
Bohrkampagne, abgeschlossen	1998
Höhe über NN	3488 m
Mittlere Oberflächentemperatur	-55° C
Oberflächenakkumulation p.a. Wasser	23 mm
Tiefe der Bohrung	3623 m
Abstand zum Untergrund, etwa	120 m
Eisalter an der Basis, [radiometrische] Jahre	> 423.000

**Tab. 12** Kennzahlen zur Wostok-Eiskernbohrung (Antarktis).

### **Methodik I: Untersuchungsgegenstand und Messreihen**

Messungen an entnommenen Eisproben bzw. an im Eis eingeschlossener Luft:

- Deuterium-Gehalt ( $\delta D_{ice}$ ) und daraus rekonstruierte Temperatur (Kerne 3G, 4G und 5G, siehe JOUZEL et al. 1996, Fig. 1): Abstand der Probennahme: 0,5 bis 2 m (bis 2.080 m), darunter 1 m; nachträgliche Re-Interpolation zu Intervallen von 1 m. Kerngewinnungsrate

<sup>101</sup> GT4: Glaciological timescale four cycles; glaziologische Zeitskala, die vier Glazialzyklen umfasst.

85% oder höher. Die Temperatur („isotopische Temperatur der Atmosphäre“) ist aus einem angenommenen Deuterium/Temperatur-Gradienten von 9 ‰/°C berechnet. Datei: deutnat.txt.

- Atmosphärischer Sauerstoff ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ ); Datei: o18nat.txt.
- Des Weiteren: Staub-, Natrium-, Methan-, und Kohlendioxid-Konzentrationen.

Alle oben aufgeführten Reihen (Variable-zu-Tiefe) sind durch die GT4-Chronologie zeitkalibriert (s. u.).

Datenverfügbarkeit (öffentlich): zahlreiche Dateien, aber nicht die Original-Rohdaten; teilweise Datenverwendung durch den Verfasser (s. u.).

### **Methodik II: Alters-zu-Tiefen-Beziehung, Konstruktion der Zeitreihe(n), Tuning**

Die Datierung des Wostok-Eiskerns erfolgt hierarchisch (vgl. KOTULLA 2013; 2014, 8-10):

(A) Die auffällige Signatur von Intervallen extremer  $\delta\text{D}$ -Oszillationen wird mit dem Sauerstoffisotopenprofil mariner Sedimente (MIS) ausgehend von der Gegenwart über insgesamt „vier Glazialzyklen“ (klimatostratigraphisch) korreliert (vgl. Abb. 21a und Abb. 21 b).

(B1) Ausgehend von dieser klimatostratigraphischen Korrelation werden zwei radiometrisch geeichte Altersfixpunkte (Anker, „Kontrollpunkte“) der marinen Isotopenkurve MIS (aus bzw. adaptiert nach BASSINOT et al. 1994, vgl. Abb. 21b) auf die Wostok-Eissäule übertragen (PETIT et al. 1999, ihre Fig. 2): Tiefe 1.534 m korrespondiert mit MIS 5.4 (110.000 [radiometrische] Jahre) und Tiefe 3.254 m korrespondiert mit MIS 11.24 (390.000 [radiometrische] Jahre).

(B2) Über ein Eisflussmodell wird im nächsten Schritt das gesamte Altersprofil (Alters-zu-Tiefen-Beziehung) des Eiskerns rechnerisch ermittelt (Abb. 21c).

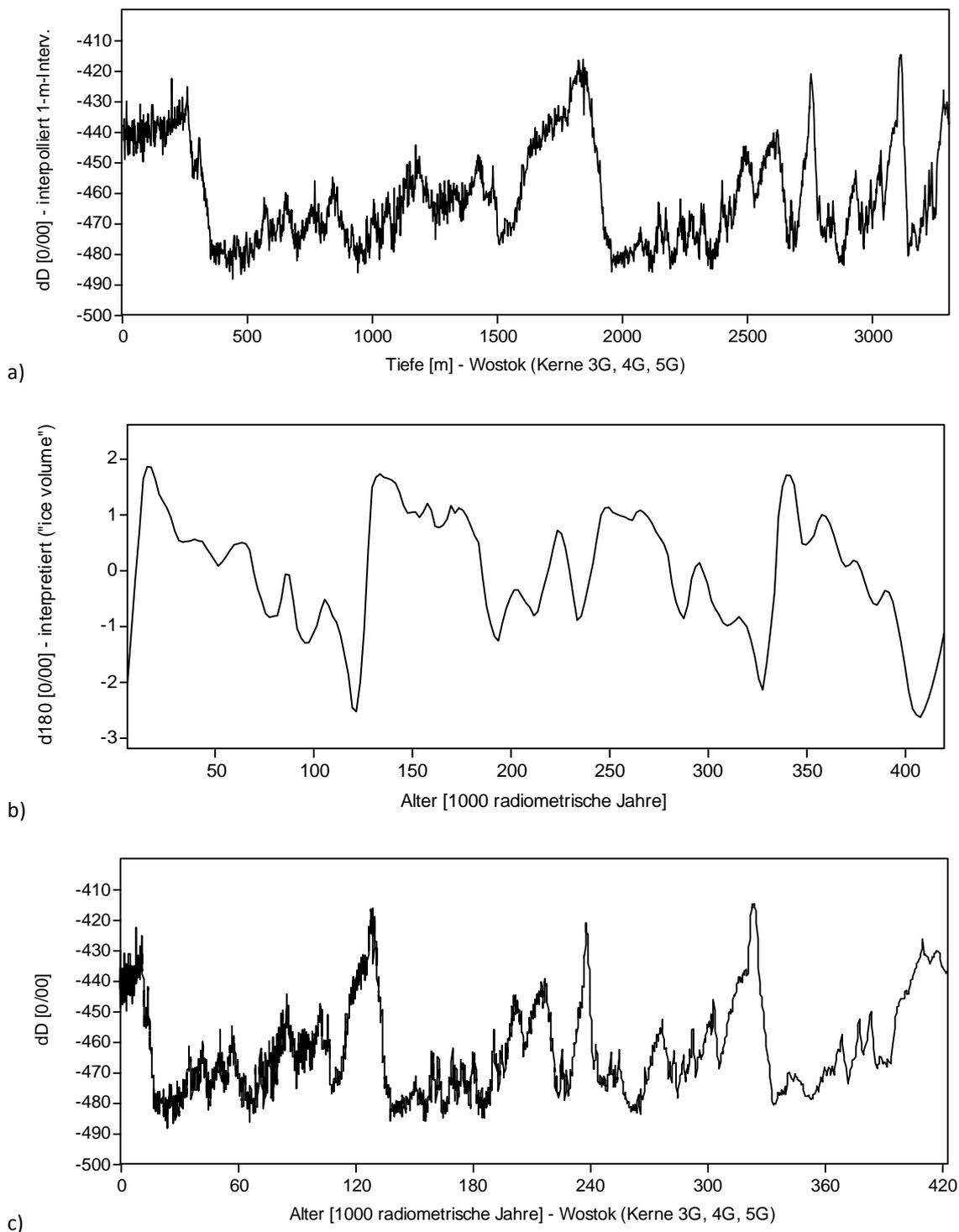
(C) Abschließend erfolgt eine Feinjustierung.

PETIT et al. (1999, ihre Fig. 3) zeigen eine Ähnlichkeit des  $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ -Profils mit der in die Vergangenheit extrapolierten, theoretischen Insolationskurve auf (bezogen auf 65° N, Mitte Juni; vgl. Abb. 23 und Abb. 24). Unter der Annahme einer (strengen) Korrelation – die Maxima der Insolationskurve korrespondieren mit den Mittelpunkten ansteigender  $\delta^{18}\text{O}$ -Oszillation – gleichen sie 14 Punkte der Orbital-Skala mit ihrer GT4-Skala ab und stellen Abweichungen von maximalen 13.000 [radiometrischen] Jahren fest (ihre Table 1). Sie erachten dies als weitere Bestätigung für die Gültigkeit ihrer GT4-Zeitskala.

### **Methodik III: Programme und Analysetechnik**

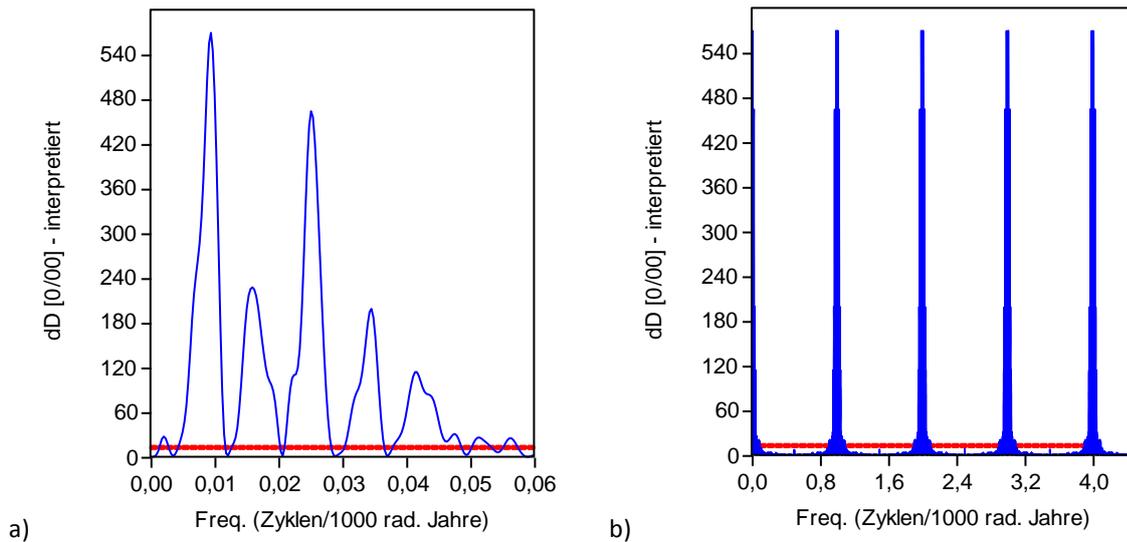
Spektralanalyse: BTM.

Programm: Analyseries (PAILLARD et al. 1996).



**Abb. 21** Datierung des Wostok-Eiskerns.

Erläuterung und Diskussion siehe Textteil. a) Deuterium-Gehalt ( $\delta D_{ice}$ ) mit der Tiefe,  $n = 3.310$ ; nachträgliche Re-Interpolation zu Intervallen von 1 m (vgl. PETIT et al., ihre Fig. 1), zusammengesetzt aus den Kernen 3G, 4G und 5G. b) Zielkurve für Datierung/Tuning: geglättete getunte Sauerstoffisotopen-Referenzkurve (MIS) für niedrige Breiten (BASSINOT et al. 1994, ihre Fig. 7), von SPECMAP-Referenzzeitskala abgeleitet; übliche Darstellung: inverse Orientierung der Ordinate;  $n = 208$ . c) Die finale Chronologie (Deuterium-Zeitreihe) nach der Alterskalibrierung und der Anwendung des Eisflussmodells,  $n = 3.310$  (,b',c' vgl. PETIT et al., ihre Fig. 2). – Dateien: ,a',c') deutnat.txt; ,b') Bassinot\_stack\_d18O.



**Abb. 22** Varianzspektrum der getunten Wostok- $\delta D$ -Zeitreihe.

a) Getunte  $\delta D$ -Reihe, extrem dominante (niedrigfrequente) Peaks: 0,00946/0,01596/0,02512/0,03457/0,04167 Zyklen/1000 radiometrische Jahre, entspricht Perioden von 106/63/40/29/24 k[r]a. Die Milankovitch-Periodizitäten, auf welche die Zeitreihe mittelbar/unmittelbar getunt wurde, sind hervorragend ausgebildet (worden): Exzentrizitätszyklus (1. Peak), Obliquitätszyklus (3. Peak) und Präzessionszyklus (5. Peak). b) Getunte  $\delta D$ -Reihe, höherfrequente Peaks: die Peak-Gruppe (vgl. ‚a‘) wiederholt sich in regelmäßigen (ganzahligen) „Abständen“ (Multiplikatoren: 1, 2, 3 etc. Zyklen/1000 radiometrische Jahre). Ein Artefakt des Tunings? – Ordinate: relative Varianz (Power); rote Linie(n): Signifikanz-Level von 95/99%; Datei: deutnat.txt.

Fig. 4	Proxy-Daten (Zeit-interpretiert und getunt)	Milankovitch-Zyklen (ka)				
		100	41	23	19	( $\pm 20$ )
a	$\Delta T_a$	X	X			(X)
b	Staub (dust)	X	X	(X)		
c	Na	X	X			(X)
d	$\delta^{18}O_{atm}$	(X)	X	X	X	
e	CO <sub>2</sub>	X	(X)			
f	CH <sub>4</sub>	X	X	X		

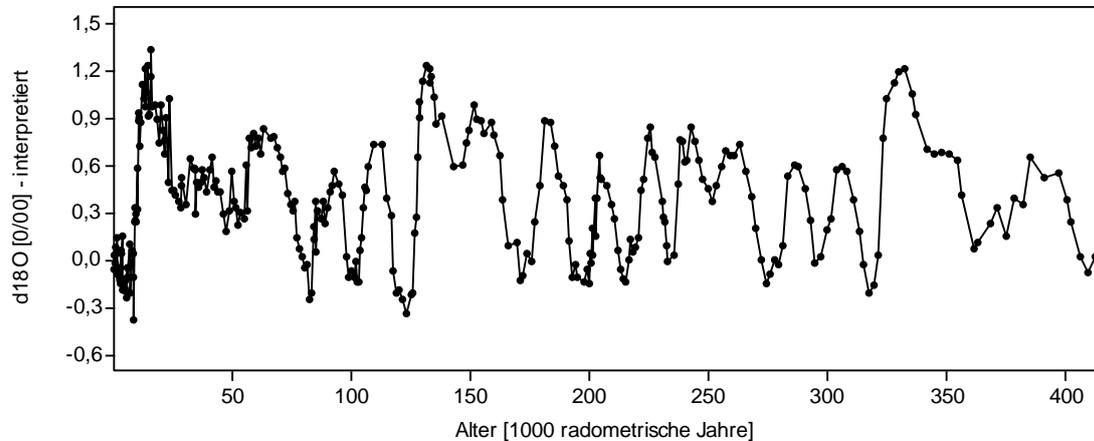
**Tab. 13** Ergebnisse der Spektralanalyse der getunten Wostok-Zeitreihen.

Tabellarische Aufstellung nach PETIT et al. (1999, insbesondere Werte ihrer Fig. 4, S. 432). Fast alle getunten Zeitreihen zeigen Periodizitäten, die den theoretischen Milankovitch-Zyklen entsprechen (siehe Textteil, insbesondere Diskussion).

### **Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Autoren**

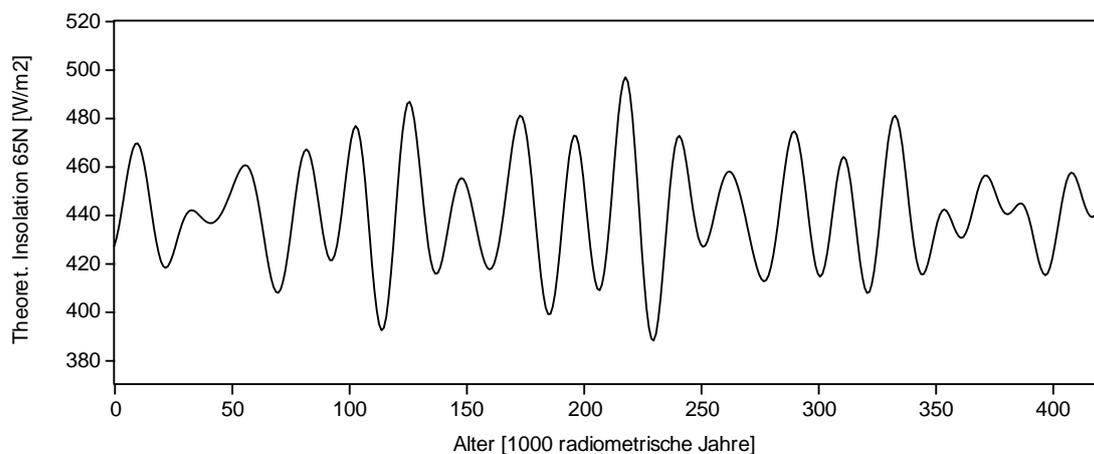
PETIT et al. (1999, 435) können für fast alle Messgrößen eine Periodizität aufzeigen, die den theoretischen Milankovitch-Zyklen entspricht (Tab. 13): „[Die, M. K.] Spektralanalyse unterstreicht die Dominanz des 100-ka-Zyklus für alle sechs Datenreihen mit Ausnahme von  $\delta^{18}O_{atm}$  und eine starke Prägung der 40-ka- und/oder 20-ka-Periodizitäten trotz des Fakts,

dass die glaziologische Datierung durch Einpassung von nur zwei Kontrollpunkten in das 100-ka-Band getunt worden ist.“<sup>102</sup>



**Abb. 23** Getunte Wostok- $\delta^{18}\text{O}$ -Zeitreihe.

Die Grafik der  $\delta^{18}\text{O}$ -Zeitreihe soll nach PETIT et al. (1999) eine große Ähnlichkeit mit der [theoretischen] Insolationkurve von Mitte Juni haben (BERGER et al. 1978); sie ist mit der unten (Abb. 24) abgebildeten aktuelleren Mitte-Juli-Kurve von 1991 (BERGER & LOUTRE) fast identisch. Von 0 bis etwa 335.000 [radiometrische] Jahre korrelieren PETIT et al. (1999) jeweils ein Insolationsmaximum mit der mittigen Position eines Maximum-Minimum-Abschnittes der  $\delta^{18}\text{O}$ -Kurve (Diskussion siehe Textteil). Darstellung üblicherweise invers (Ordinate). Datei: o18nat.txt, n = 318.



**Abb. 24** Theoretische Insolation für 65° N (Monatsmitte Juli).

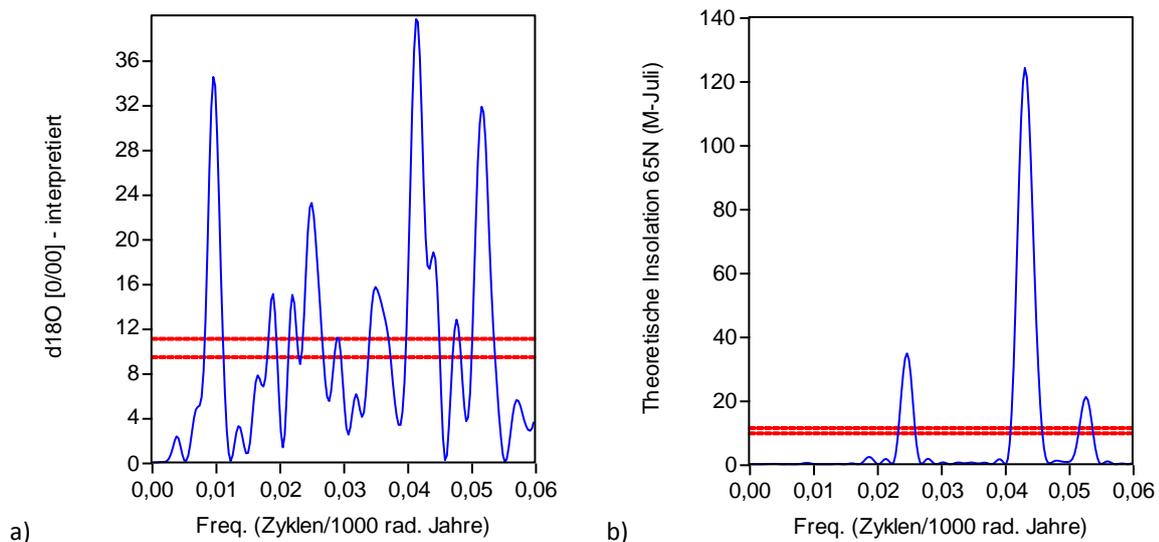
Nach BERGER & LOUTRE (1991), Darstellung für 420.000 [astronomische] Jahre, Bestrahlung in  $\text{W/m}^2$  (vgl. Abb. 2), n = 421. Datei: ORBIT91.

## Diskussion

Die Häufigkeit und quasi Durchgängigkeit von Periodizitäten, die den theoretischen Milankovitch-Zyklen entsprechen (Tab. 13) ist zunächst bemerkenswert. Nach MULLER & MACDONALD (2000, 118) ist die Wostok-Zeitskala (GT4) nicht auf eines der Orbitalmodelle

<sup>102</sup> PETIT et al. (1999, 435): „Spectral analysis emphasizes the dominance of the 100-kyr cycle for all six data series except  $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$  and a strong imprint of 40- and/or 20-kyr periodicities despite the fact that the glaciological dating is tuned by fitting only two control points in the 100-kyr band.“

getunt worden („but not tuned to any orbital model“); dies mache die Wostok-Daten unvoreingenommen (unbiased)<sup>103</sup>. Eine ungetunte GT4-Chronologie („untuned time scale“, MULLER & MACDONALD 2000, 144) mit Milankovitch-Periodizitäten wäre – oberflächlich betrachtet – ein Indiz für die Milankovitch-Theorie. Allerdings sind die ursprünglichen Datenreihen bereits interpretiert und verändert. Aufgrund der Korrelation mit der marinen Isotopenkurve MIS, einer (Komposit-) Kurve, die radiometrisch geeicht, geglättet, gefiltert und auf Milankovitch-Periodizitäten getunt ist, und aufgrund der konkreten Übernahme von zwei Altersfixpunkten erfolgt zwangsläufig eine Imprägnation der GT4-Zeitskala mit Milankovitch-Periodizitäten (Abb. 22 und Abb. 25). Das ist der Grund, warum sich die [theoretische] Insulationskurve und die GT4-Zeitskala „ähneln“.



**Abb. 25** Varianzspektren der  $\delta^{18}\text{O}$ -Zeitreihe (Wostok) und Insulationskurve ( $65^\circ\text{N}$ ).

a) Getunte  $\delta^{18}\text{O}$ -Zeitreihe (vgl. Abb. 23). Vier dominante Peaks: 0,00966/0,02507/0,04138/0,05167 Zyklen/1000 radiometrische Jahre, entsprechen Perioden von 104/40/24/19 k[r]a. Die Milankovitch-Periodizitäten, auf welche die Zeitreihe mittelbar/unmittelbar getunt wurde, sind gut ausgebildet (worden): Exzentrizitätszyklus (1. Peak), Obliquitätszyklus (2. Peak) und Präzessionszyklen (3./4. Peak). Datei: o18nat.txt, n = 318. b) Insolation,  $65^\circ\text{N}$ , Mitte Juli (vgl. Abb. 24): Das Spektrum zeigt die Konstruktionselemente, den theoretischen Obliquitätszyklus (40,5 k[a]a) und die Variationen des theoretischen Präzessionszyklus (23/19 k[a]a), mit ihren Frequenzen von 0,02470/0,04315/0,05268 Zyklen/1000 [radiometrische/astronomische] Jahre. Datei: ORBIT91, n = 421. – Ordinate: relative Varianz (Power); rote Linien: Signifikanz-Level von 95/99 %.

Darüber hinaus ist festzuhalten, dass PETIT et al. (1999, 435) ausdrücklich erwähnen, dass die GT4-Zeitskala auf „das 100-ka-Band getunt worden“ ist. Etwas überrascht scheinen sie allerdings über den „Sachverhalt“, dass durch diese Einphasung sogar die 40-ka- und/oder 20-ka-Periodizitäten ausgeprägt sind (vollständiges Zitat siehe oben).

An diesem Beispiel wird ein weit verbreitetes Missverständnis deutlich. Bei den Proxy-Zeitreihen der antarktischen Eiskerne handelt es sich nicht – wie häufig angenommen bzw.

<sup>103</sup> Andere Übersetzung: frei von systematischen Fehlern. Der vollständige Satz von MULLER & MACDONALD (2000, 118): „The untuned time scale makes the Vostok data unbiased with regard to many of the features we are interested in.“

geglaubt – um Rohdaten-Reihen, sondern um Zeit-interpretierte und durch zielgerichtetes Tuning Milankovitch-Periodizitäten-imprägnierte, neue bzw. veränderte Datenreihen.

### ***Systematik***

Tuning, unmittelbar und mittelbar.

### ***Fazit***

Die Arbeit von PETIT et al. (1999) ist konform zu der konventionellen spätquartären Konstruktion von Glazial/Interglazial-Zyklen, denen eine Dauer von etwa 100.000 [radiometrischen] Jahren zugewiesen werden. Ihre „Bestätigung“ einer starken Prägung der Klima-Zeitreihen mit der Periodizität der [theoretischen] Obliquität und der Periodizität der [theoretischen] Präzession ist dem Orbitaltuning geschuldet und ist ein Zirkelschluss.

## **5.7 Untersuchung unterkretazischer Sedimentfolgen in Norddeutschland im Rahmen eines ausgewiesenen Zyklen-Projektes**

### ***Titel***

NEBE (1999): Zyklenuntersuchungen an unterkretazischen Sedimenten in NW-Deutschland – Nachweisbarkeit von Milankovitch-Zyklen.<sup>104</sup>

### ***Lithostratigraphie, Untersuchungsgebiet***

Formation: k. A.; Kernbohrungen (Hoheneggelsen, Kirchrode) und Tagesaufschlüsse (Moorberg, Grube Gott, Frielingen) aus dem Großraum Hannover sowie England (Speeton, Yorkshire).

### ***Stratigraphisches Alter***

Hauterivium-Stufe bis Albium-Stufe (Unterkreide).

### ***Beschreibung und Relevanz***

Im Fokus von NEBES Arbeit stehen unterkretazische Sedimentgesteine, „(...) die durch eine deutliche Ton-/Mergelsteinwechselfolge im Dezimeter- bis Meterbereich gekennzeichnet sind“ (S. 5); im Aufschluss treten die Wechselfolgen als „Hell-/Dunkelbankung in Erscheinung“. NEBE weist den Wechselfolgen eine rhythmische Prägung zu. Zielsetzung seiner (zyklostratigraphischen) Arbeit ist, „(...) den Charakter und die zeitliche Dauer sedimentärer und geochemischer Zyklen in der Unterkreide zu bestimmen.“

---

<sup>104</sup> Teil des „Boreal Cretaceous Cycles Project“ (BCCP); im Rahmen des DFG Schwerpunktprogramms „Globale und regionale Steuerungsprozesse biogener Sedimentation: Riff-Evolution und Kreide-Sedimentation.“

### **Methodik I: Untersuchungsgegenstand und Messreihen**

Verschiedene Messungen am Sedimentgestein und an entnommenen Sedimentgesteinsproben.

- Grauwertmessung: Scan-Verfahren (SCHAAF & THUROW 1994, 1997); Auflösung: 3.300 Punkte/m. 466 Bohrkernmeter (11 Bohrkern): ca. 1,5 Mio. Grauwertdaten; Tagesaufschlussprofile: ca. 11.000 Grauwertdaten.  
Programm: NIH-Image 1.62.7.  
Datenaufbereitung: Korrekturfunktion (Standard-Ausleuchtungskurve, Anwendung von Filtern zur „Rauschbefreiung“); manuelle Korrektur von Störungen (Rissen, Muschelschill, Bioturbationen etc.) mit Time-Series-Assistant 1.51 (SCHAAF 1995) durch Löschung oder Ersatz (Mittelwert) der Daten.
- Bohrlochmessungen: Gamma-Ray (GR), 1.200 Messwerte (Hoheneggelsen).
- Geochemische Analysen:  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\text{CaCO}_3$ , TC, TOC. Jeweils 146 Proben in einem 1-m-Abstand (Kirchrode).

### **Methodik II: Programme und Analysetechnik**

Spektralanalyse: FFT, BTM.

Programm: Arand (HOWELL 1995), AnalySeries 1.0a7 (PAILLARD et al. 1996).

### **Methodik III: Bildung und Vergleich von Zyklenverhältnissen, Alters-zu-Tiefen-Beziehung**

Die Daten-aufbereiteten Reihen (s. o.) bilden die Wertereihen für die Spektralanalyse (Variable zu Sedimenttiefe bzw. Profilmeter).

Ein theoretisches Milankovitch-Gesamtbandbreiten-Powerspektrum, in Form von Milankovitch-Zyklenverhältnissen für Exzentrizität (E3-E1), Obliquität (O2-O1) und Präzession (P2-P1), normalisiert auf P1 und P2 (Tab. 14), wird an ausgewählten Punkten auf die erzeugten Powerspektren der Sediment-Zyklen „gelegt“. Abgeglichen werden die Zyklenverhältnisse; eine finale Zuweisung (Einpassung bei Maximalanzahl der Übereinstimmungen) der Sediment-Zyklen zu den Milankovitch-Periodizitäten erfolgt aber erst, wenn die durchschnittliche Sedimentationsrate auch passt. Diese wird mit autoritativen Quellen (GRADSTEIN et al. 1994) ermittelt:<sup>105</sup>

- Hauterivium-Stufe (5 Millionen [radiometrische] Jahre):  $\emptyset$  3 cm/1000 [radiometrische] Jahre (Mächtigkeit: ca. 150 m, nach SCHOTT et al. 1967, 1969).
- Albium-Stufe (13,3 Millionen [radiometrische] Jahre):  $\emptyset$  2,26 cm/1000 [radiometrische] Jahre (Mächtigkeit: ca. 300 m, nach SCHOTT et al. 1967, 1969).

<sup>105</sup> So scheidet zum Beispiel in einem Fall (NEBE 1999, 32; Bsp. Hoheneggelsen, KB 46, Grauwerte) die Alternative in Spalte 15 aus, „(...) da ihre Sedimentationsrate mit 6,23 cm/1000 a als zu hoch angesehen werden muss.“ Die zugehörige Auswertetabelle (NEBES Tab. 1, S. 122) zeigt in Spalte 15 ebenfalls vier Übereinstimmungen von Milankovitch-Zyklenverhältnissen wie die final ausgewählte Spalte 9. Die Sedimentationsrate wird verglichen mit einem errechneten Wert von 3 cm/1000 Jahre, der sich aus der Gesamtmächtigkeit von etwa 150 m (SCHOTT 1967, 1969) und der [radiometrischen] Dauer des Hauterivium von 5 Millionen Jahren (GRADSTEIN et al. 1994) ergibt.

Normierung	Theoretische Milankovitch-Zyklen (k[a]a)						
	E3 (413)	E2 (123)	E1 (95)	O2 (50,2)	O1 (38,8)	P2 (22,3)	P1 (18,5)
Verhältniszahlen: zu P1	22,32	6,65	5,14	2,71	2,1	1,21	1,0
Verhältniszahlen: zu P2	18,52	5,52	4,26	2,25	1,74	1,0	0,83

**Tab. 14** Normierung der Verhältniszahlen der theoretischen Milankovitch-Zyklen.

Die Normierung erfolgt auf die theoretischen Präzessionszyklen P1 und P2 (nach NEBE 1999, 27-28); Erklärung und Diskussion siehe Textteil. Zyklen-Perioden nach BERGER et al. (1992) für den „Zeitpunkt“ 100 Millionen [radiometrische] Jahre vor heute (aktuell Grenzbereich Unterkreide/Oberkreide).

### **Ergebnisse und Schlussfolgerungen des Autors**

NEBE hat in seiner Arbeit eine Vielzahl von Zyklen berechnet; dabei hat er – nach eigener Aussage – [theoretische] Milankovitch-Zyklen nachgewiesen.<sup>106</sup> Die Zusammenstellung in Tab. 15 zeigt die Ausprägung der Intensitäten der den theoretischen Milankovitch-Zyklen zugewiesenen Powerspektren der Sediment-Zyklen von der oberen Hauterivium-Stufe bis zur oberen Albium-Stufe. Das Ergebnis ist eine durchgängige „Abdeckung“. Aus seiner Untersuchung folgert er abschließend (S. 106): „Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Zyklenanalysen, dass eine Orbitalsteuerung durch Milankovitch-Zyklen in der Unterkreide NW-Deutschlands als ein steuernder Faktor der Sedimentation angenommen werden kann.“

Stufe	Zuweisung der Sediment-Zyklen zu den theoret. Milankovitch-Zyklen (Intensität der Powerspektren)			Profil
	E	O	P	
Oberes Albium	3	2	1-2	K II
Mittleres Albium	2-3	1	2-3	K II
Unteres Albium	2-3	1-2	1-2	KB 36, KB 33, KB 32, K II
Oberes Aptium	2-3	1	1	KB 51, KB 52, KB 36
Unteres Aptium				(unzureichend)
Oberes Barremium	2-3	2	2	KB 55, KB 61, KB 39
Unteres Barremium	2-3	1	1-2	KB 55, Tagesaufschlüsse
Oberes Hauterivium	2-3	1-2	2-3	KB 46, KB 49, Tagesaufschlüsse

**Tab. 15** Intensität der Varianz unterkretazischer Sediment-Zyklen (NW-Deutschland).

Für jede untersuchte stratigraphische Einheit von der oberen Hauterivium-Stufe bis zur oberen Albium-Stufe kann NEBE Sediment-Zyklen den theoretischen Milankovitch-Zyklen zuweisen (Diskussion siehe Textteil). Legende: Intensität: 1 = niedrig, 2 = mittel, 3 = hoch; Profil: KB: Kernbohrungen Hoheneggelsen; K II: Kernbohrung Kirchrode; nach NEBE 1999, 104-106 und seine Abb. 59.

### **Diskussion**

NEBE reklamiert für sich, in allen Fällen alle [theoretischen] Milankovitch-Zyklen (P1-2, O1-2, E1-3) nachgewiesen zu haben. Dies gilt für alle untersuchten Sedimentfolgen (10 Kern- und vier Aufschlussprofile) und sogar für alle verwendeten Datentypen (Grauwert-, Gamma-Ray- und geochemische Reihen). Dies verwundert nicht, wenn NEBES Zielformulierung betrachtet

<sup>106</sup> Wörtlich (NEBE 1999, 104): „In der vorliegenden Arbeit wurden eine Vielzahl von Zyklen berechnet. Dabei konnten Milankovitch-Zyklen nachgewiesen werden.“

wird (S. 1, kursiv durch den Verfasser): „Der *Nachweis* von Milankovitch gesteuerten Sedimentationszyklen steht in dieser Arbeit im Mittelpunkt der Untersuchungen.“

Es stellt sich die grundsätzliche Frage, ob das von NEBE primär eingesetzte Verfahren zur Datengewinnung, die Grauwerteaufnahme entlang des Sedimentkerns, sowie die damit verbundenen, notwendigen Datenaufbereitungs- und Datennachbearbeitungsschritte, zu verlässlichen Aussagen über eine Zyklizität führen kann. Das Powerspektrum bspw. zur Bohrung Hoheneggelsen (KB 49, 2-30 m)<sup>107</sup> zeigt insgesamt 29 verschiedene Sediment-„Zyklen“ (Perioden in m): 0,24; 0,28; 0,33; 0,34; 0,36; 0,45; 0,48; 0,51; 0,54; 0,57; 0,62; 0,66; 0,69; 0,75; 0,83; 0,88; 0,99; 1,09; 1,18; 1,26; 1,40; 1,59; 2,01; 2,43; 3,12; 3,80; 4,78; 6,02 und 10,54. Eine zyklische Real-Sedimentation in dieser Periodendichte ist unwahrscheinlich. Es scheint, als seien „Zyklen“ (systemisch) konstruiert worden.

NEBES *Nachweis*-Methode ist das Aufzeigen einer hohen Übereinstimmungsquote (max. 7) der Sediment-Zyklen mit den [theoretischen] Milankovitch-Zyklen auf Basis ihrer Verhältniszahlen (Zyklenverhältnisse). Die Aussagekraft der Verhältniszahlenkombination wird aber nur qualitativ diskutiert<sup>108</sup>. Eine statistische Aussage, insbesondere in Bezug zur jeweiligen „Zyklen“dichte (s. o.) fehlt. Wird NEBES Bewertung gefolgt, so ist die „Übereinstimmungsquote“ um systemisch erzeugte „Zyklen“ (und damit verbundenen Übereinstimmungen) und um den Start- bzw. Auflagepunkt (Primärzuweisung von P1 oder P2, = eine Übereinstimmung) zu reduzieren. Unter diesen Gegebenheiten würden nicht mehr als ein oder zwei Übereinstimmungen für die untersuchten Abschnitte verbleiben; damit sind – auch nach NEBES qualitativer Einschätzung – keine verlässlichen Aussagen möglich.

Des Weiteren fehlt eine Signifikanzaussage zum jeweiligen Powerspektrum. Die qualitative, dreistufige Einteilung der Intensität des Powerspektrums (niedrig, mittel, hoch) ist unbefriedigend (vgl. Tab. 15). Es scheint, als läge ein Großteil der vermeintlichen Sediment-Zyklen unterhalb einer aussagekräftigen Signifikanz. NEBE hinterfragt sein Verfahren nicht grundsätzlich: Zu den zahlreichen Zyklen, die nicht in die Milankovitch-Bandfrequenzen fallen, weiß er nur wenig zu sagen.<sup>109</sup>

NEBES Überprüfungsverfahren (Verifizierung), dass es sich tatsächlich um Milankovitch-Zyklen handelt, basiert auf einer abhängigen Eichung der Sedimentationsrate: Die numerische (zeitliche) Kalibrierung der (zuvor zeitlosen) Sediment-Zyklen einerseits mit der Dauer der theoretischen Milankovitch-Zyklen und andererseits mit Werten, die sich aus der geologischen Zeitskala ableiten. Diese Vorgehensweise ist irreleitend und mündet in einen Zirkel-

<sup>107</sup> NEBES Abb. 16 (S. 34) in Verbindung mit S. 123, seine Tab. 3.

<sup>108</sup> NEBE (1999, 28): „Denn die Wahrscheinlichkeit, dass sich [sic] diese Verhältniszahlenkombination nicht auf Zufall beruht, steigt mit der Anzahl der gefundenen Milankovitch-Zyklenverhältnisse. Deshalb sind sieben gefundene von sieben Milankovitch-Zyklenverhältnissen als optimal anzusehen. Sechs bzw. fünf Milankovitch-Zyklenverhältnissen sind als gut zu bezeichnen, vier gefundene Milankovitch-Zyklenverhältnisse bieten noch eine ausreichende Aussagekraft. Bei drei Zyklen wird es sehr schwierig, eine sichere Aussage zu treffen.“

<sup>109</sup> NEBE (1999, 29): „Über den Ursprung von Zyklen im Powerspektrum, die nicht als Milankovitch-Zyklen identifiziert werden konnten, lassen sich nur Vermutungen anstellen. Es ist zurzeit nicht möglich, diese Zyklen bestimmten periodischen Ereignissen zu zuordnen (...). Im Bereich der Milankovitch-Zyklen (eine Mio. a bis 10.000 a) sind keine anderen Zyklengruppen bekannt, die sich in [sic] gleicherweise über Zyklenverhältnisse in Beziehung setzen lassen, wie es mit den Milankovitch-Zyklen möglich ist. So bleiben in einem Powerspektrum immer Zyklen übrig, die nicht zugeordnet werden können.“

schluss: „Zur Überprüfung der ermittelten Milankovitch-Zyklen aus den untersuchten Bohrungen und Tagesaufschlüssen dienten die Sedimentationsraten, die aus den Milankovitch-Zyklen berechnet wurden.“<sup>110,111</sup> Bei den vermeintlichen Nachweisen von [theoretischen] Milankovitch-Zyklen handelt es sich einfach um Zuweisungen.

Ändert sich der radiometrische Altersrahmen, sind die Zuweisungen der Sediment-„Zyklen“ zu den theoretischen Milankovitch-Zyklen nicht mehr „konform“. Die aktuelle Dauer der Hauterivium-Stufe beträgt 3,1 Millionen [radiometrische] Jahre (GTS2012). Das sind 42 % weniger verglichen mit der GTS1994 (5,0 Millionen [radiometrische] Jahre, s. o.); gleichermaßen verändert sich auch die durchschnittliche Sedimentationsrate.

### **Systematik**

Zuweisung.

### **Fazit**

Es handelt sich bei dieser Dissertation im Rahmen des „borealen kretazischen Zyklen-Projektes“ um eine ziel- und ergebnisgerichtete Untersuchung. Die zugrundeliegende Idee des Aufzeigens einer hohen Übereinstimmung von Milankovitch-Zyklenverhältnissen mündet methodisch in eine (einfache) Zuweisung, die versuchte Verifizierung vermeintlicher Milankovitch-Zyklen in einen Zirkelschluss. Der Nachweis bzw. die Nachweisbarkeit der [theoretischen] Milankovitch-Zyklen ist nicht gelungen; der Titel der Arbeit ist irreleitend.

## **5.8 Messeler Ölschiefer: Zyklische Sedimentation im Meter-Bereich?**

### **Titel**

EL BAY et al. (2001): Milankovitch Signals in Messel „Oilshales“. [*Milankovitch-Signale in den Messel-„Ölschiefern“*].

### **Lithostratigraphie, Untersuchungsgebiet**

Mittlere Messel-Formation, Grube Messel (NE Darmstadt, Hessen).

### **Stratigraphisches Alter**

Eozän.

<sup>110</sup> Weiter heißt es (NEBE 1999, 1): „Diese sind mit den Sedimentationsraten verglichen worden, die sich aus den Mächtigkeiten der abgelagerten Sedimente in der Umgebung der untersuchten Bohrungen und Tagesaufschlüsse und aus der zeitlichen Länge einer stratigraphischen Stufe errechnen lassen (Literaturdaten). Dabei sind gute Übereinstimmungen festgestellt worden.“

<sup>111</sup> Beispiel in Ergänzung zu Fußnote 105: Sediment-„Zyklus“ mit einer Periode von 0,61 m in Kombination mit P2 (22.300 [astronomischen] Jahren) ergibt eine Sedimentationsrate von 0,027 mm/a bzw. 2,7 cm/1000 a. Dieser Wert passt zu den 3 cm/1000 a, der aus der radiometrischen Datierung abgeleitet wurde. Aufgrund dieser Übereinstimmung erfolgt final die Zuweisung von P2 zu dem Sediment-„Zyklus“.

### **Beschreibung und Relevanz**

EL BAY et al. (2001) untersuchten die obersten 80 m des Messeler Ölschiefers<sup>112</sup> der Kernbohrung KB2 auf mögliche Periodizitäten der Sedimentation (Varianzen mit der Tiefe). Nach eigenen Aussagen zeigten die Rohdaten-Logs (GR, MS; ihre Fig. 2) keine unmittelbar erkennbaren periodischen Komponenten, sodass sie Frequenzanalysen durchführten. Über ein Erkennen (eine Bestätigung) von [theoretischen] astronomischen Zyklen erhofften sie sich Rückschlüsse zur Sedimentationsrate und zur Kompaktion.<sup>113</sup>

Der Messeler Ölschiefer ist ein Organik-reicher, stark wasserhaltiger Schwarzpelit, der unterschiedlich fein laminiert ist; nach unten (zum Liegenden hin) nehmen geringmächtige, extraklastführende Resedimente zu.

### **Methodik I: Untersuchungsgegenstand und Messreihen**

Datengenerierung: Bohrlochmessungen der Kernbohrung KB2 von 1980, nur die obersten 80 m<sup>114</sup> (der nahezu 160 m tiefen Bohrung):

- Gamma-Ray-Log (GR): nachträgliche Digitalisierung der analogen Originaldaten (Bohrlochmessgeschwindigkeit 5 m/min; Probennahme alle 5 s, entspricht alle ~42 cm); zu Intervallen von 5 cm (Interpolation?).
- Magnetische Suszeptibilität (MS): Nachvermessung (in 2000?) an den gelagerten Bohrkernen in Abständen von 5 cm.<sup>115</sup>

Datenaufbereitung: Prüfung auf Vollständigkeit und mögliche fatale Fehler; Lücken in den MS-Daten wurden durch lineare Interpolation geschlossen.

### **Methodik II: Alters-zu-Tiefen-Beziehung, Konstruktion der Zeitreihe(n)**

Alters-zu-Tiefen-Transformation:  $\emptyset$  Sedimentationsrate: 0,15 mm/[W]a (GOTH 1990).

GOTH bezeichnet den Ölschiefer als Algenlaminit und nimmt eine Warvierung an; durch stichprobenweises „Auszählen von Jahreslagen“ errechnet er eine Sedimentationsrate von 0,1-0,2 mm pro [Warven-] Jahr. Demnach würde die Bildungszeit der 80 m Ölschiefer einer Dauer von etwa 533.000 [Warven-] Jahren entsprechen.

### **Methodik III: Programme und Analysetechnik**

Spektralanalyse: FFT.

<sup>112</sup> Die Grube Messel ist eine Fossilienlagerstätte mit außergewöhnlicher Erhaltung der Organismen; seit 1995 UNESCO-Weltnaturerbe.

<sup>113</sup> EL BAY et al. (2001, 69): „Recognition of astronomical cycles would permit inferences of sedimentation rates and compaction.“

<sup>114</sup> Die Sedimentfolge wird als mehr oder weniger kontinuierlich gebildet beschrieben: „The upper 80 m are more or less uninterrupted ‚oilshale‘ and GR and MS have a ‚stably irregular‘ character“ (EL BAY et al. 2001, 70).

<sup>115</sup> LIEBIG (2001, 5) beschreibt den Gesamtzustand der Kerne (KB 1, 2, 4, 5 und 7) von 1980 wie folgt: „Eine Bestandsaufnahme im Jahr 1998 ergab, dass noch etwa 85 % des Kernmaterials existierte. Bis auf wenige Ausnahmen sind die Kerne vollständig ausgetrocknet. Ihr Zustand reicht von völlig zerfallen bis vollständig und nicht zerbrochen.“

Keine weiteren Angaben.

### **Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Autoren**

Als Ergebnis ihrer Zeitreihenanalyse präsentieren die Autoren Spektren mit Peaks bei 20, 40, 53 und 96 Tausend [Warven-] Jahren, die sie näherungsweise den [theoretischen] astronomischen Zyklen<sup>116</sup> der Präzession (21), der Obliquität (41, 54) und der Exzentrizität (100 Tausend [astronomische] Jahre) in Beziehung setzen (ihre Fig. 3; siehe Tab. 16). Der [theoretische] astronomische 100-ka-Zyklus wird als Durchschnitt von Variationen zwischen 93 und 123 Tausend [astronomischen] Jahren angesehen; das starke Signal bei 123 Tausend [Warven-] Jahren wird letzterem zugewiesen. Der [theoretische] astronomische 400-ka-Zyklus sei nur marginal aufgelöst (Wellenlänge von etwa ~60 m). Des Weiteren liegen fünf weitere Peaks vor, die nicht mit den (näherungsweise) [theoretischen] astronomischen Zyklen korrespondieren. Unter gewissen Annahmen leiten sie eine durchschnittliche Sedimentationsrate von  $0,146 \pm 0,052$  mm pro [Warven-]<sup>117</sup> Jahr ab (Output).

Sie folgern abschließend: „Das Erkennen ziemlich klarer Milankovitch-Zyklen in der Messel-„Ölschiefer“-Sedimentation an sich ist bedeutend. Die Beziehung zu klimatischen, physikalischen und mineralogischen Aspekten ist zu diesem Zeitpunkt eine offene Frage (...).“<sup>118</sup>

Sediment- „Zyklen“ Wellenlänge Ca.-Wert	MS		GR	
	Intensität Ca.-Wert	Theor. Milank.- Zyklus [k[a]a]	Intensität Ca.-Wert	Theor. Milank.- Zyklus [k[a]a]
3 m	0,2	21	0,15?	21
6 m	0,15	41	0	
7 m	0,1		0,2	
7,5 m	0,3		0,5	
(8 m)		54		54
8,5 m	0,2		0,25	
9,5 m	<0,1		0,3	
11 m	0,3		0,7	
12,5 m	0,1		0,8	
14,5 m	0,3	100	0,75	100
18 m	0,9	123	0,8	123

**Tab. 16** Ergebnisse der Spektralanalyse der MS- und GR-Zeitreihen (Messeler Ölschiefer). Zuweisung von spektralanalytisch-ermittelten Sediment-„Zyklen“ zu den theoretischen Milankovitch-Zyklen (siehe Textteil). Intensität des Varianzspektrums auf max. 1,0 normalisiert; nach EL BAY et al. (2001), ihre Fig. 3.

<sup>116</sup> Perioden der theoretischen astronomischen Zyklen nach BERGER & LOUÏRE (1994).

<sup>117</sup> Implizit werden Warvenjahre und astronomische Jahre durch die Autoren gleichgesetzt.

<sup>118</sup> EL BAY et al. (2001, 71): „The recognition of rather clear Milankovitch cycles in the Messel ‘oilshale’ sedimentation is important by itself. The relation to climatic, physical and mineralogical aspects is an open question at this point, (...)“

## **Diskussion**

Die hohe Anzahl von 10 Sediment-Zyklen im Perioden-Intervall zwischen 3 und 18 m (Tab. 16) und die Zunahme der Intensität mit der Wellenlänge lässt nicht auf ein Abbild einer Real-Sedimentation schließen; statt dessen scheinen Zyklen (systemisch, methodisch-inhärent) kreiert worden zu sein. Die (vermeintlich wichtigen) Sediment-„Zyklen“ mit einer Wellenlänge von 3 m und 6 m weisen niedrige (relative) (Varianz-) Intensitäten auf ( $\leq 0,2$ ). Es fehlt insgesamt eine Aussage zur Signifikanz.

Methodisch sind einigen der spektralanalytisch ermittelten Sediment-„Zyklen“ die theoretischen Milankovitch-Zyklen zugewiesen worden (Tab. 16): Den fraglichen Sediment-Zyklen von 3 bzw. 6 m die astronomischen 21-ka- bzw. 41-ka-Zyklen, den Sediment-Zyklen von 7,5 und 8,5 m (gemittelt 8 m) der astronomische 54-ka-Zyklus und den fraglichen Sediment-Zyklen mit großer Wellenlänge (14,5 und 18 m) der astronomische 100-ka-Zyklus.

Nach MERZ & RENNE (2005) leiteten EL BAY et al. aus den Frequenzanalysen Milankovitch-typische Zyklensignale ab, die eine durchschnittliche Sedimentationsrate von 0,15 m pro Tausend [Warven-] Jahre anzeigen<sup>119</sup>. Diese Aussage allerdings ist irreführend. Denn die Frequenzanalyse wurde mit der Inputgröße von 0,15 mm pro [Warven-] Jahr durchgeführt (s. o., GOTH 1990). Der Output entspricht dem Input: gerundet 0,15 mm pro [Warven-] Jahr bzw. 0,15 m pro Tausend [Warven-] Jahre. Die Frequenzanalyse ist keine eigenständige und unabhängige Altersbestimmungsmethode. Die von MERZ & RENNE genannten 0,9 bzw. 1,3 Millionen [Warven-] Jahre für die Dauer der Sedimentation<sup>120</sup> können deshalb nicht von der von EL BAY et al. gewählten Sedimentationsrate abgeleitet werden. Auch LENZ et al. (2011) äußern sich gleichermaßen irreführend, wenn sie – ohne auf die Annahmen und die Inputgröße von 0,15 mm/a hinzuweisen – schreiben, dass EL BAY et al. über Gamma-Ray-Logs und die magnetische Suszeptibilität, quasi unabhängig, eine Sedimentationsrate von  $0,146 \pm 0,052$  mm/a kalkulierten (vgl. Abschnitt 5.13).

Schließlich mündet das Anliegen der Autoren, unabhängige Sedimentationsraten aus dem „Erkennen“ von [theoretischen] Milankovitch-Zyklen zu erschließen, in einen Zirkelschluss: Denn der (spektralanalytische) Output basiert auf den (Warven-kalibrierten) Input (s. o.).

## **Systematik**

Zuweisung.

## **Fazit**

Die Frequenzanalysen von EL BAY et al. sind zielgerichtet (und nicht ergebnisoffen) auf [theoretische] „Milankovitch-Signale“ hin durchgeführt worden. So ist es nicht erstaunlich, dass

---

<sup>119</sup> MERZ & RENNE (2005, S. 71): „From frequency analyses EL BAY et al. (2001) derived Milankovitch cycle-type signals which indicate an average sedimentation rate of 0.15 m/k.y. and a sedimentation period of ca. 1.3 m.y. in total as well as 0.9 m.y. exclusively for the oil shale sedimentation without the basal clastic intercalations (EL BAY 2001).“

<sup>120</sup> Bezogen auf 135 Meter (Anteil KB2 80 m + ca. 55 m Tagebau) bzw. 195 Meter Ölschiefer (Anteil KB2 140 m + ca. 55 m Tagebau). Vgl. EL BAY (2001, 70): „Below it [80 m, M. K.], to about 140 m, ‚oilshale‘ is more and more intercalated with clastic sediments (...).“

die Autoren „ziemlich klare Milankovitch-Zyklen“ erkennen. Ungeachtet der Zuweisung der Sediment-„Zyklen“ zu den theoretischen Milankovitch-Zyklen ist es unwahrscheinlich, dass in der mittleren Messel-Formation eine vielfache zyklische Sedimentation im Meter-Bereich vorgelegen haben soll.

## 5.9 Zyklostratigraphische Fein-Kalibrierung des Buntsandstein

### **Titel**

MENNING et al. (2005): Zeitskala für Perm und Trias in der stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002, zyклоstratigraphische Kalibrierung der höheren Dyas und Germanischen Trias und das Alter der Stufen Radium bis Rhaetium 2005.

### **Lithostratigraphie, Untersuchungsgebiet**

Buntsandstein-Gruppe (Beschränkung auf diesen Abschnitt), Mitteleuropäisches Becken.

### **Stratigraphisches Alter**

Oberer Teil der Changhsingium-Stufe (Perm) bis unterer Teil der Ansim-Stufe (Mitteltrias).

### **Beschreibung und Relevanz**

MENNING et al. (2005, 174) zufolge weist das (migrierende) Zentrum des Mitteleuropäischen Beckens für den Abschnitt vom Oberem Rotliegend bis zum Mittleren Keuper ein nahezu komplettes Sedimentprofil auf (Folgen ro1 bis k2, ca. 266–229 Millionen [radiometrische] Jahre). Die Gruppen<sup>121</sup> werden hauptsächlich mit der Methodik der Sequenzstratigraphie hierarchisch in Folgen und (Klein-) Zyklen gegliedert.

Eine erste (hochauflösende) kleinzyklische Gliederung des Buntsandstein erfolgte durch GELUK & RÖHLING (1997). In Erweiterung ihres methodischen Ansatzes wendet SZURLIES (2004a) eine Kombination aus einer hochauflösenden Zyklostratigraphie und Gamma-Ray-Logs an und scheidet für die Folgen s1-s6 52 Kleinzyklen (Sohlbankzyklen<sup>122</sup>) aus, mit schwankenden (Zyklus-) Mächtigkeiten zwischen 5 und 20 Metern.

Die Korrelation des Buntsandstein bzw. der Perm/Trias-Grenze im globalen Kontext (Germanische Trias und tethyale Trias) erfolgt magnetostratigraphisch, durch Vergleich und Zuweisung der „bemerksenswert dicken normalen Magnetozone sn1“ in Deutschland (SZURLIES 2004b, MENNING et al. 2005, 186-189, ihre Abb. 1) zur magnetischen Überlieferung der formalen Perm/Trias-Grenze (bzw. des Grenzbereiches) in China (magnetische „Zone V“, GSSP Meishan). Mittels dieser Korrelation werden einige wenige radiometrische Alter „importiert“ (übertragen).

<sup>121</sup> Die fünf Gruppen und ihre 33 Folgen sind (nach der STD 2002 und MENNING et al. 2005, 173): Rotliegend (ro1-ro4), Zechstein (z1-z7), Buntsandstein (s1-s7), Muschelkalk (m1-m9) und Keuper (k1-k6). Die Folgen werden als quasi-isochrone Zeitscheiben aufgefasst; die 33 Folgen wiederum basieren auf 230 (Klein-) Zyklen, die ebenfalls als quasi-isochrone Zeitscheiben betrachtet werden.

<sup>122</sup> Eine nach oben fein-körniger werdende klastische Sedimentfolge.

Die (deutsche) Stratigraphische Tabelle wird für den gesamten Abschnitt (s. o.) mangels radiometrischer Daten (Fehlen von Tuffen) zyклоstratigraphisch (fein-) kalibriert. Dabei wird angenommen, dass die Sedimentation („wahrscheinlich“) von [theoretischer] Milankovitch-Dauer (Milankovitch-Zyklen) gesteuert ist.

### ***Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Autoren***

Für die Buntsandstein-Gruppe werden insgesamt 60, für die Untertrias 51 Kleinzyklen ausgeschieden; es wird angenommen, dass sie klimatisch gesteuert sind und der Dauer eines astronomischen 100-ka-Zyklus (kurze Exzentrizität) entsprechen. Diese Zuweisung erfolgt unter der Vorgabe des radiometrischen Altersrahmens, denn weder ein 400-ka-Zyklus (etwa Faktor 4 zu hoch) noch ein 40-ka-Zyklus (etwa Faktor 2,5 zu klein) würde passen.<sup>123</sup> „Eine Dauer von ca. 400 ka (lange Exzentrizität) oder ca. 40 ka (Schiefe der Ekliptik, obliquity) ist diesen Kleinzyklen bei Berücksichtigung der aktuellen Isotopenalter nicht zuzuordnen.“<sup>124</sup>

**Wenn Milankovitch-Zyklizität angenommen wird, so kann es sich nur um den 100-ka-Zyklus handeln. Davon ausgehend beinhaltet die Indusium-Stufe eine Dauer von ca. 1,5 Ma, nämlich das Zeitäquivalent von ca. 15 Kleinzyklen des Unteren Buntsandstein“** (MENNING et al. 2005, 197; fett im Original). Zusammen mit der Dauer der Olenikum-Stufe zu ca. 3,6 Millionen [astronomischen] Jahren ergibt sich für die Untertrias eine Dauer von 5,1 Millionen [astronomischen] Jahren.<sup>125</sup>

Die aktuelle, globale Geologische Zeitskala (GTS2012) weist eine bemerkenswerte Übereinstimmung der sowohl radiometrisch als auch astronomisch ermittelten Spannen der Untertrias aus: „Folglich umspannen die 51 Zyklen 5,1 Ma, die identisch sind mit der Spanne von 5,2 Ma für die zusammengefassten Indusium- und Olenikum-Stufen, die von Radioisotopen-Daten (ca. 252,16 bis 247 Ma) abgeleitet sind“ (OGG 2012, 705).

### ***Diskussion***

Die Anzahl der von den Bearbeitern ausgewiesenen (Klein-) Zyklen für die Folgen s1 bis s6 des Buntsandstein variieren; sie schwanken zwischen 70 (GELUK & RÖHLING 1997) und 52 (MENNING et al. 2005); KOZUR & BACHMANN (2005) bspw. gliedern 57 (davon 9 fehlend) aus. Bereits GELUK & RÖHLING (1997) interpretierten die Zyklen als („möglicherweise“) alternierende, relativ feuchte und trockene klimatische Perioden mit einer Periodizität von etwa 100.000 [radiometrischen] Jahren; diese zyklischen Muster stünden („höchstwahrscheinlich“) in Beziehung zu den [theoretischen] Milankovitch-Klimazyklen.

Der (subjektive) Ausweis einer Anzahl von Zyklen und ggf. einer Anzahl fehlender Zyklen kann als steuerndes Element einer jeweiligen Harmonisierung mit der radiometrischen Al-

<sup>123</sup> Hier wird auch eine uniforme, simple Vorgehensweise deutlich. Mit einer Kombination unterschiedlicher Zyklen könnte theoretisch das gleiche Ergebnis erzielt werden.

<sup>124</sup> Eine inhaltlich gleiche Aussage auch in MENNING & KÄDING (2013, 165).

<sup>125</sup> Zuordnung der Einheiten der Buntsandstein-Gruppe in die Untertrias: a) Indusium-Stufe: unterer Teil des Kleinzyklus s1.2 der Calvörde-Folge bis Grenzbereich der Kleinzyklen s2.6 und s2.7 bzw. unterer Teil des Kleinzyklus s2.7 der Bernburg-Folge; insgesamt 15 Kleinzyklen. b) Olenikum-Stufe: bis inkl. Kleinzyklus s6.4 der Solling-Folge; insgesamt 36 Kleinzyklen.

tersspanne genutzt werden. Der jeweils aktualisierten (wechselnden) radiometrischen Dauer der Untertrias, in der jüngeren Vergangenheit zwischen 5,2 und 7,0 Millionen [radiometrischen] Jahren<sup>126</sup>, kann ein „Paket“ von 50 bis 70 theoretischen 100-k[a]a-Zyklen in Beziehung gesetzt werden. Das System ist in weiten Grenzen dehn- und stauchbar.<sup>127</sup>

Insofern ist die Übereinstimmung radiometrischer und astronomischer Spannen für die Untertrias in der GTS2012 (s. o.) nicht bemerkenswert; vielmehr wird sie durch Radioisotopen-Daten und Anpassung der (informalen) Definition der Basis der Anisium-Stufe bestimmt (OGG 2012, 715, Table 25.3, Kommentar zu „Anisian base“). Der Basis wird ein Isotopenalter von ~247 Millionen [radiometrische] Jahre zugewiesen. Dazu wird konform die Zyκλοstratigraphie von MENNING et al. zugrunde gelegt, nämlich Röt (s7) an die Basis der Anisium-Stufe zu stellen. Damit umfasst die Untertrias aktuell 5,2 Millionen [radiometrische] bzw. 5,1 Millionen [astronomische] Jahre.

## Typ

Zuweisung.

## Fazit

Die zyκλοstratigraphische Fein-Kalibrierung des Buntsandstein erfolgt durch Zuweisung eines passenden [theoretischen] Milankovitch-Zyklus (kurze Exzentrizität). Hierfür maßgeblich ist der radiometrische Altersrahmen. Es wird kein Versuch unternommen, diesen (theoretischen) Milankovitch-Zyklus nachzuweisen<sup>128</sup>.

<sup>126</sup> Geologische Zeitskalen: STD 2002: 7,0 M[a]a; ESTD 2005: 5,1 M[a]a; GTS2008: ~6,1 M[r]a; GTS2012: 5,1 M[a]a bzw. 5,2 M[r]a; STDK 2012: 7,0 M[a]a – unverändert zu STD 2002. [a]: es wird davon ausgegangen, dass der jeweilige Abschnitt „astronomisch“ (fein-) kalibriert wurde. – Stratigraphische Tabellen: Deutschland: <http://www.stratigraphie.de/aktuelles/index.html>; unter Punkt 9.3 „Stratigraphische Tabelle von Deutschland Kompakt 2012 (STDK 2012)“ sowie weitere unter Punkte 9.3.1 und 9.3.2. International: <http://stratigraphy.org/index.php/ics-chart-timescale>; Tabelle v2014/10 und ältere Versionen.

<sup>127</sup> SZURLIES' (2004b) Gliederung der Volpriehausen-Folge (von SZURLIES Formation genannt) in (genau) 9 klastische Abfolgen (Zyklen) kann weder an dem lithologisch-schematischen Profil des Top der Folge (siehe Fig. 3) noch am vollständigen Gamma-Ray-Log (siehe Figs. 4 und 7) nachvollzogen werden, mit Ausnahme der drei (der fünf) Marker-Horizonte, die die Basis eines Zyklus (Grenzsandstein, GZ; Liograptasandstein, LS; Görtelsandstein, GS) bilden. Primär interpretiert er die Abfolgen als kleinskalige, nach oben (in der Korngröße) feiner werdende Zyklen („fining upward cycles“, Sohlbankzyklen), alternativ als ± symmetrische Base-Level-Zyklen. Letztere kommen in Frage, Milankovitch-Zyklen (ca. 100k-Jahr-Exzentrizität) zu reflektieren („are considered to reflect“). Auf Basis dieser Annahme folgert SZURLIES (S. 408), dass die Dauer der Volpriehausen-Folge mindestens 0,9 Millionen [astronomische/radiometrische] Jahre betrage. – Ein Base-Level-Zyklus ist ein Baustein des (interpretativen) Konzeptes der Sequenzstratigraphie und soll eine genetische Sequenz aus Base-Level-Fall (Verflachung des Environments, Sinken der Erosionsbasis, regressive Sequenz - Halbzyklus) und Base-Level-Rise (Vertiefung des Environments, Steigen der Erosionsbasis, transgressive Sequenz - Halbzyklus) beschreiben. Der Umkehrpunkt bildet die Transgressionsfläche. *Base level* ist die Erosionsbasis, eine (abstrakte) sedimentologisch definierte Fläche, die für jeden Küstenraum und seine angeschlossenen Bereiche spezifisch ist und Bereiche ausgliedert, in welchen einerseits Sedimentation und andererseits Erosion überwiegen (vgl. SCHÄFER 2010).

<sup>128</sup> Aus einer anderen Perspektive betrachtend, aber mit ähnlichem Ergebnis (TIETZE & RÖHLING 2013, 241): „Und schließlich finden sich bereits Festlegungen auf diese ~100 ka-Zyklen (MENNING & KÄDING 2013, dieser Band). Das mag so sein und ist für überschlägige Betrachtungen zu begrüßen, wirkliche Belege dafür gibt es jedoch nicht.“

## 5.10 Zyklusstratigraphische Interpretation einer kurzen kretazischen Sedi- mentfolge in Griechenland

### **Titel**

KARAKITSIOS & AGIADI-KATSIAOUNI (2007): Regional Correlation and Cyclostratigraphy in the Mid-Cretaceous Formations of the Ionian Zone. [*Regionale Korrelation und Zyklusstratigraphie in den mittelkretazischen Formationen der Ionischen Zone*].

### **Lithostratigraphie, Untersuchungsgebiet**

Viglia Limestone Formation; Gotzikas-Profil, S Tsamandas, NW Epirus (Griechenland).

### **Stratigraphisches Alter**

Viglia Shale Member: Untere Aptium-Stufe (Unterkreide); Viglia Limestone Formation (im strengen Sinne): Albium- bis Turonium-Stufe (Unter- und Oberkreide).

### **Beschreibung und Relevanz**

KARAKITSIOS & AGIADI-KATSIAOUNI beschreiben den tiefsten Teil des Gotzikas-Profiles, das Viglia Shale Member (13,2 m), als eine rhythmische Abfolge karbonatreicher und -armer Horizonte, die sie vollumfänglich mit dem OAE1a-Ereignis<sup>129</sup> korrelieren (ihre Fig. 4).<sup>130</sup> Die Sedi-  
mentfolge wird auch als Schwarzschieferablagerung („black shale deposition“) bezeichnet. In den untersten 4,5 m wechsellagern kieselige/mergelige Kalksteine mit schwarzen Organik-  
reichen Schiefen.

Um periodische Muster in den Kohlenstoffgehalten ( $\delta^{13}\text{C}$ ) der Ablagerungen zu identifizieren, wendeten die Autoren die Spektralanalyse auf die  $\delta^{13}\text{C}$ -Zeitreihe an („zyklusstratigraphische Methodologie“).<sup>131</sup>

### **Methodik I: Untersuchungsgegenstand und Messreihen**

Datengenerierung: Stabile Isotopen und TOC-Gehalte (hier relevant  $\delta^{13}\text{C}$ ); Probennahme in unregelmäßigen Abständen von 3-50 cm.  $\Sigma$  67 Wertepaare (siehe Abb. 26).

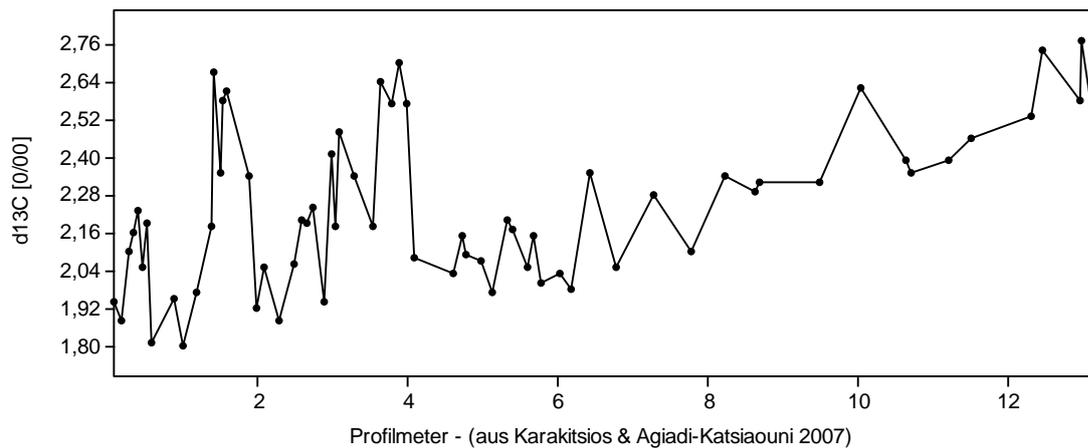
Datenverfügbarkeit: ihre Tab. 2.

Datenverwendung: durch den Verfasser (s. u.).

<sup>129</sup> OAE: Oceanic Anoxic Event, ozeanisches anoxisches Ereignis. In der Kreide werden mehrere Organik-reiche Horizonte ausgegliedert: OAE 1a-1d, 2 und 3. Sie werden als Bildungen eines sauerstoffarmen oder -freien Ablagerungsmilieus gedeutet.

<sup>130</sup> An anderer Stelle der Arbeit wird die Sedimentfolge so beschrieben: 20 individuelle karbonatreiche, mergelige Horizonte (10-40 cm mächtig), denen mergelige Kalksteine (20–50 cm mächtig) zwischengelagert sind.

<sup>131</sup> „A cyclostratigraphic methodology was applied to the Lower Viglia Shale Member deposits (...). In order to identify periodic patterns in the isotopic content of the deposits, spectral analysis on the  $\delta^{13}\text{C}$  time-series was applied (...)“ (KARAKITSIOS & AGIADI-KATSIAOUNI 2007, 94).



**Abb. 26**  $\delta^{13}\text{C}$ -Wertereihe (Viglia Shale Member, Gotzikas-Profil, Griechenland). Punkt-/Liniendarstellung vom Liegenden (0 m) zum Hangenden (13,2 m),  $n = 67$ . Es soll sich um eine rhythmische (zyklische) Sedimentfolge handeln (siehe Textteil). Nach KARAKITSIOS & AGIADI-KATSIAOUNI (2007), vgl. ihre Fig. 2.

### **Methodik II: Alters-zu-Tiefen-Beziehung, Konstruktion der Zeitreihe(n)**

Alters-zu-Tiefen-Transformation:  $\emptyset$  Sedimentationsrate von 0,66 cm/1000 [r]a.

### **Methodik III: Programme und Analysetechnik**

Datenaufbereitung: u. a. Trendeliminierung („detrending“) und „Vorglättung“ („prewhitening“)<sup>132</sup>; lineare Interpolation (wegen uneinheitlicher Probenabstände).

Spektralanalyse: MEM, MTB, BTM.

Prüfungen: Stationarität.

Programm: AnalySeries (PAILLARD et al. 1996).

### **Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Autoren**

Als zyклоstratigraphisches Ergebnis ihrer Arbeit stellen KARAKITSIOS & AGIADI-KATSIAOUNI heraus, dass die [theoretischen] Milankovitch-Zyklen der kurzen Exzentrizität ( $e_1$ ,  $e_2$ ) und der Obliquität ( $O$ ) am besten in der Sedimentfolge aufgezeichnet sind (siehe Tab. 17); sie folgern: „Die Sedimentation in der unteren Aptium-Stufe des Ionischen Beckens scheint durch Orbitalsteuerung kontrolliert.“

Nur aufgrund der Umrechnung der Sedimentationsraten schließen sie, dass die Wechselagerung Organik-reicher und Organik-armer Karbonate mit (anoxischen) Pulsationen der Präzession in Verbindung stehen: „Ein Vergleich der Orbitalzyklen und den von LASKAR (1999) errechneten Amplitudenmodulationen mit dem hypothetischen Altersmodell für diesen Teil des Gotzikas-Profiles erlaubt die Schlussfolgerung, dass die Ablagerungen der Schwarzschiefer-Horizonte (...) von länger periodischen Präzessionsamplituden moduliert wurden.“

<sup>132</sup> „(...) detrending (incorporating mean subtraction), pre-whitening (coeff. = 0.7), arc sin transformation (WEEDON 2003)“ (KARAKITSIOS & AGIADI-KATSIAOUNI 2007).

Neben der Milankovitch-Steuerung wird als weiterer Steuerungsmechanismus ein zunehmender Tiefenwasseraufstieg durch die Öffnung neuer Zugänge zur mediterranen Thethys angenommen.

MEM (Fig. 5)		MTM (Fig. 6)		BTM (Fig. 7)	
Periode [k[r]a]	th. Milank.-Zyklus	Periode [k[r]a]	th. Milank.-Zyklus	Periode [k[r]a]	th. Milank.-Zyklus
727		512		727	
333	E (404,1)	353	E	471	E
216		244		286	
				205	
140	e1 (123,9)	142	e1	136	e1
96	e2 (94,8)	94	e2	96	e2
64	O (62,5)	64	O	65	O
51	o (54)			51	o

**Tab. 17** Spektrale Analyse der  $\delta^{13}\text{C}$ -Zeitreihe (Gotzikas-Profil, Griechenland).

Die Aufstellung zeigt für die unterschiedlichen spektralen Analysemethoden (MEM, MTM, BTM) die Perioden in radiometrischen Jahren und die Zuweisung der Sediment-„Zyklen“ zu den theoretischen Milankovitch-Zyklen (Diskussion siehe Textteil, vgl. auch mit Tab. 18). Die Ergebnisse sind den Figs. 5-7 von KARAKITSIOS & AGIADI-KATSIAOUNI (2007) entnommen.

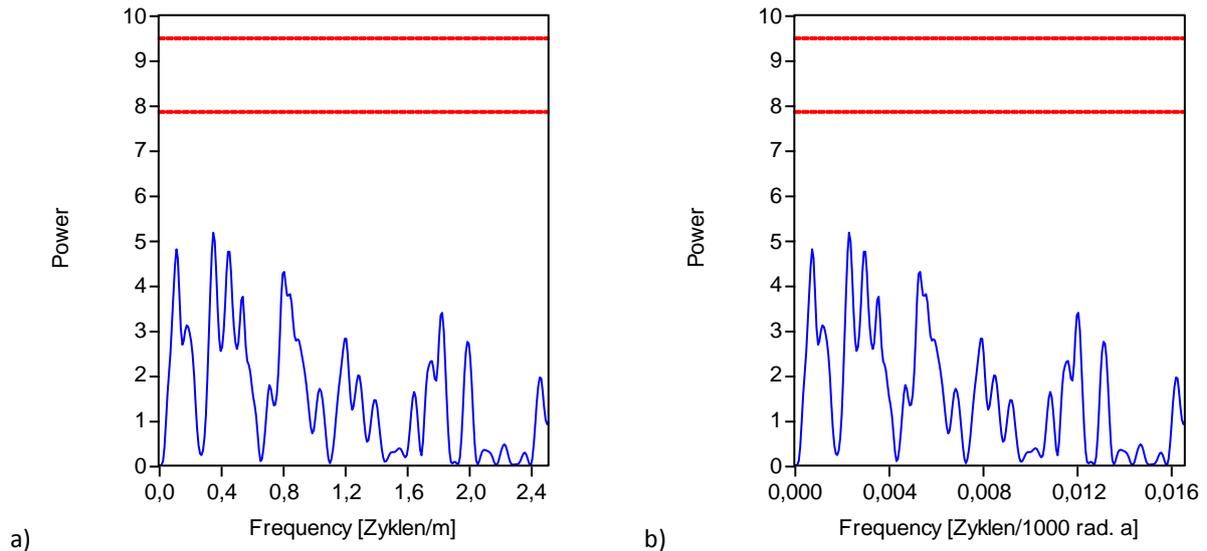
## Diskussion

Im Vergleich zu den Varianzspektren von KARAKITSIOS & AGIADI-KATSIAOUNI (2007, ihre Figs. 5-7) zeigt das Lomb-Periodogramm (Abb. 27) derselben  $\delta^{13}\text{C}$ -Reihe (Abb. 26) keine markanten Peaks. Die Intensitäten der „Peaks“ liegen deutlich unterhalb der Signifikanz-Level; insofern scheint die Sedimentation auf Basis der  $\delta^{13}\text{C}$ -Daten chaotischer Natur.

Des Weiteren ist nicht nachvollziehbar, warum die Profile der Spektren so stark voneinander abweichen. Werden zehn Frequenzen (Perioden) der insignifikanten Peaks des Lomb-Periodogramms (Abb. 27) mit dem MEM-Spektrum verglichen, sind max. zwei Übereinstimmungen festzustellen (0,0030/~0,016 „Zyklen“/k[r]a; Tab. 18); darüber hinaus nehmen die Varianzintensitäten des MEM-Spektrums (ihre Fig. 5) zu höheren Frequenzen deutlich zu. Dies lässt darauf schließen, dass durch die Datenaufbereitung und die Wahl der Analyseparameter Peaks „herausgearbeitet“ (moduliert) worden sind.

Für die ausgewiesenen Milankovitch-Zyklen E, e1, e2, O und o stellen die Autoren keinen konkreten Bezug zur Lithologie der Abfolge her. Die zusätzlichen Frequenzen, eine 727-k[r]a-Periode (MEM, BTM) und eine 353-k[r]a-Periode (MTM) wird mit einer möglichen Überlagerung der Präzessions- und Exzentrizitäts-Periodizitäten erklärt. Genau das sollte aber eine Spektralanalyse entschlüsseln. Für die Ungenauigkeiten haben sie zahlreiche Ad-hoc-Erklärungen bereit.<sup>133</sup>

<sup>133</sup> „Slight shifts in the periodicities of the orbital cycles, as shown in the spectra (Figs 5-7), relative to those predicted by Laskar (1999), are observed and may be explained in a number of ways. These power spectra are based on a hypothesized age model (assuming constant sedimentation rates), formulated according to the biostratigraphic and field data, and in conjunction with the regional correlation presented. Therefore the expected discrepancies between the above age model and the actual age-depth relationship would



**Abb. 27** Lomb-Periodogramme der  $\delta^{13}\text{C}$ -Reihen (Gotzikas-Profil).

a)  $\delta^{13}\text{C}$ -Wertereihe (Rohdaten). b)  $\delta^{13}\text{C}$ -Zeitreihe. – Da bei der Alters-zu-Tiefen-Transformation durchgängig eine Sedimentationsrate Anwendung fand, sind die Varianzspektren in ihrer Signatur identisch. Die zahlreichen Peaks liegen deutlich unterhalb der Signifikanz-Level von 95/99% ( $\alpha = 0,05/0,01$ ; rote Linien). Daten: KARAKITSIOS & AGIADI-KATSIAOUNI (2007), ihre Tab. 2.

Die Herleitung der durchschnittlichen Sedimentationsrate von 0,66 cm/1000 [r]a ist unklar. Auf Basis der Mächtigkeit von 13,2 m würde die Bildungsdauer des Viglia Shale Member 2 Mio. [radiometrische] Jahre betragen. Der Profilabschnitt repräsentiert nicht die gesamte Untere Aptium-Stufe, wird er doch ausschließlich mit dem Selli-Level (OAE1a-Ereignis, oberster Teil der Unteren Aptium-Stufe) des Kompositprofils von Poggio le Guaine/Fiume Bosso (Zentralitalien) korreliert (vgl. KARAKITSIOS & AGIADI-KATSIAOUNI 2007, ihre Fig. 4 mit GALEOTTI et al. 2003, ihre Fig. 1). Es hat den Anschein, als sei die Sedimentationsrate von KARAKITSIOS & AGIADI-KATSIAOUNI (2007) erst durch „Einpassung“ an die Milankovitch-Frequenzbänder „final“ festgelegt worden. Die „Dauer“ des Selli-Ereignisses wird aktuell mit etwa 1,1 Millionen [radiometrische] Jahre auf Grundlage eines Orbitaltunings angegeben (OGG & HINNOV 2012, 819; MALINVERNO et al. 2010<sup>134</sup>). Das ist etwa Faktor 2 kleiner verglichen mit KARAKITSIOS & AGIADI-KATSIAOUNI (2007); ihre ermittelten Perioden müssten um etwa 50 % gekürzt werden, wenn nicht andere Stellschrauben verändert werden.

tend to shift the regular cyclicity frequencies in the spectra. Furthermore, the calculations of the orbital parameters produced by Laskar (1999) range back to the last 19 My only. It is highly improbable that the same parameters stand true for MidCretaceous time as well. Finally, general limitations of the pre-processing and spectral estimation methods applied herein may have contributed to the shifts in spectral frequencies” (KARAKITSIOS & AGIADI-KATSIAOUNI 2007, S. 97).

<sup>134</sup> Für das Tuning wurden folgende [theoretische] Orbitalzyklen (Durchschnittsperioden für die Aptium-Stufe, 120 Mio. [radiometrische] Jahre) verwendet: Lange Exzentrizität (404 k[a]a), kurze Exzentrizität (124/94,9 k[a]a), Obliquität (37 k[a]a) und Präzession (20,3 k[a]a); ihre Supporting Information Nr. 5 mit dem Dateinamen palo1588-sup-0005-taC01.txt, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009PA001769/supinfo>).

Verfasser	Karakitsios & Agiadi-Katsiaouni 2007; MEM (Fig. 5)	
Frequenz (Zyklen/k[r]a)	Frequenz (Zyklen/k[r]a)	Periode [k[r]a]
0,00075		
	0,0014	727
0,0023		
0,0030	0,0030	333
0,0036		
	0,0046	216
0,0053		
	0,0071	140
0,0080		
	0,0104	96
0,0121		
0,0131		
0,0162	0,0157	64
	0,0196	51

**Tab. 18** Vergleich spektraler Analysen des Gotzika-Profils (Griechenland).

Daten: KARAKITSIOS & AGIADI-KATSIAOUNI (2007), ihre Tab. 2 und ihre Fig. 5.; Diskussion siehe Textteil.

### **Systematik**

Zuweisung.

### **Fazit**

Die analysierte  $\delta^{13}\text{C}$ -Rohdatenreihe der kretazischen Sedimentfolge im untersten Teil des Gotzikas-Profils (Untere Aptium-Stufe) lässt auf keine zyklische (rhythmische) Sedimentation schließen; vielmehr ist eine chaotische Sedimentation anzunehmen. Mit der Zuweisung von (vermeintlichen) Sediment-Zyklen zu den Milankovitch-Frequenzen haben KARAKITSIOS & AGIADI-KATSIAOUNI [theoretische] Milankovitch-Zyklen nicht nachgewiesen.

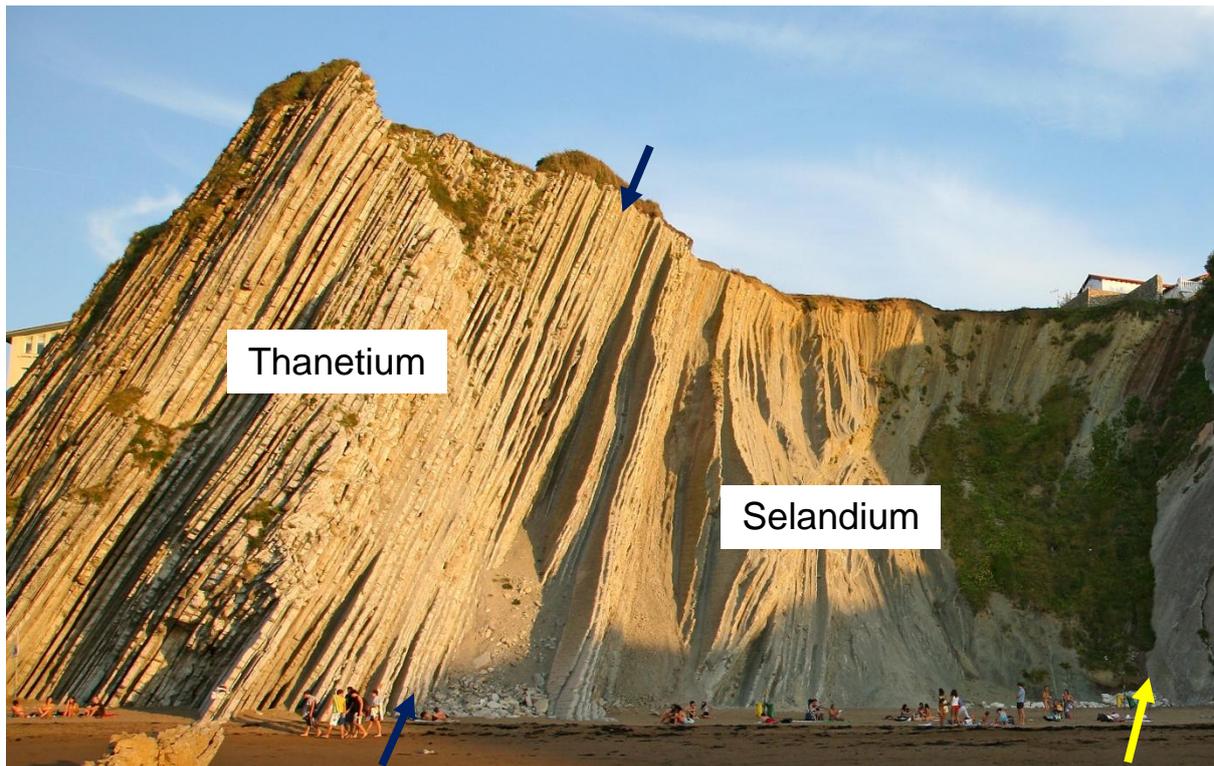
## **5.11 Versuch einer astronomischen Kalibrierung des Paläozäns mit dem theoretischen kurzen Exzentrizitätszyklus an erbohrten Kalkschlämmen der Tiefsee**

### **Titel**

WESTERHOLD et al. (2008): Astronomical calibration of the Paleocene time. [*Astronomische Kalibrierung der Paläozän-Zeit*].

### **Lithostratigraphie, Untersuchungsgebiet**

Nicht angewendet (Tiefseesedimente); fünf Tiefsee-Sedimentkerne aus dem NW-Pazifik und SE-Atlantik. Ergänzend ein Land-basiertes Profil bei Zumaia, Nordspanien.



**Abb. 28** Sedimentfolge an der Steilküste von Zumaia, Nordspanien (1).

Die (rhythmisch-) alternierende Folge aus Kalksteinen, Kalkmergelsteinen und Mergeln (Itzurun Formation) wird zyклоstratigraphisch interpretiert, zahlreiche Lagen werden als Turbidite angesprochen. Die gesamte (Küsten-) Abfolge, auch die liegenden und hangenden Bereiche, wird auch als Flyschsediment interpretiert. – An diesem Strandabschnitt sind formal die stratigraphischen Referenzpunkte (GSSP) für die Thanetium-Stufe (Oberes Paläozän, blauen Pfeile markieren die Basis) und die Selandium-Stufe (Mittleres Paläozän, gelber Pfeil markiert die Basis) festgelegt worden. Die Basis der Thanetium-Stufe liegt etwa 29 m über der Basis der Selandium-Stufe und etwa 78 m über der Kreide/Paläozän-Grenze, die weiter südlich aufgeschlossen ist. Nach SCHMITZ et al. (2011); zur Fortsetzung des Itzurun-Strandes nach Süden, siehe Abb. 29. Foto: © txakel – fotolia.com; Einfügungen durch den Verfasser.

### ***Stratigraphisches Alter***

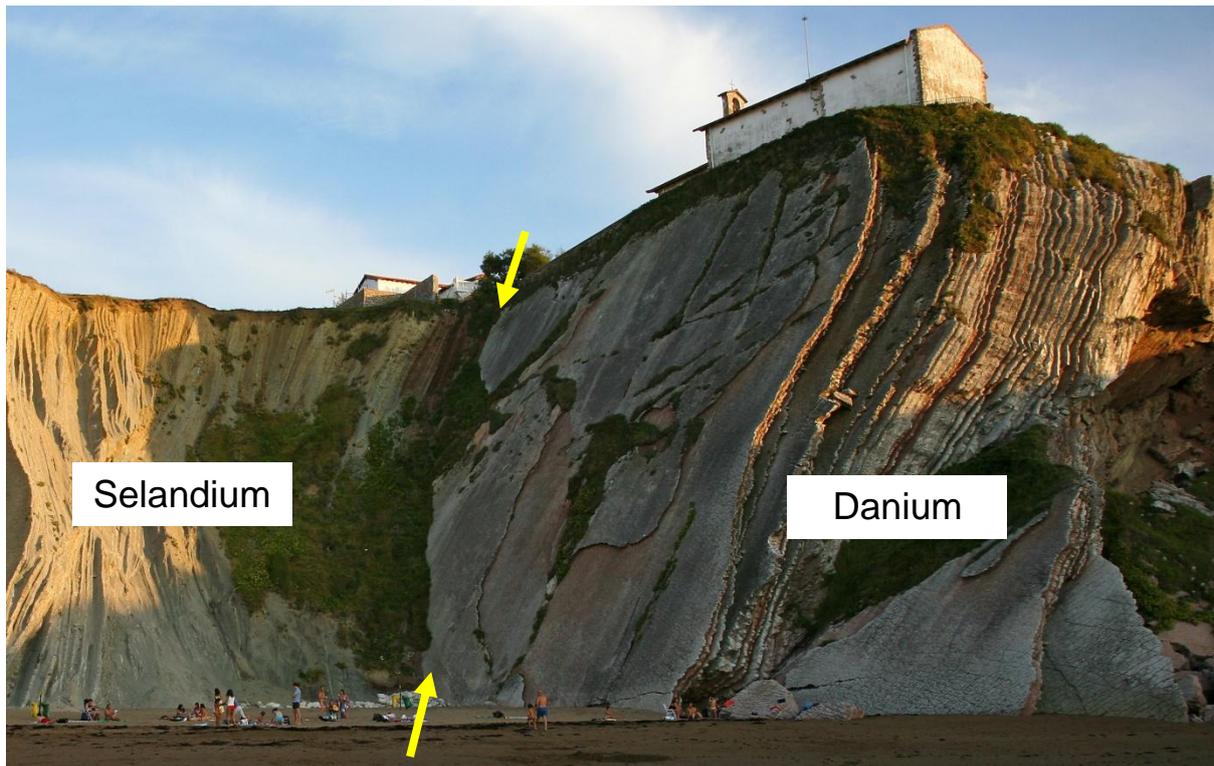
Paläozän.

### ***Beschreibung und Relevanz***

Das Hauptziel der Arbeit ist die erstmalige Zurverfügungstellung einer vollständig astronomisch kalibrierten Zeitskala für das Paläozän (S. 391).

Die untersuchten Sedimente aus Bohrtiefen von etwa 120-320 Meter unter dem Meeresboden (Leg 198 und Leg 208, Tab. 19) sind unverfestigt (nicht lithifiziert).<sup>135</sup> Sie bestehen hauptsächlich aus Nanofossil-reichen Kalkschlämmen, der Tonanteil ist untergeordnet und variiert. In allen Profilen sind dunkle oder braune tonreiche Lagen auffällig. Ihnen werden drei Ereignisse zugeschrieben:

<sup>135</sup> Siehe Berichte der Bohrkampagnen: Proceedings of the Ocean Drilling Program. Initial Reports, vol. 198 und vol. 208 (Shipboard Scientific Party 2002, 2004).



**Abb. 29** Sedimentfolge an der Steilküste von Zumaia, Nordspanien (2). Fortsetzung des Itzurun-Strandes (südlicher Abschnitt), vgl. Abb. 28. Am Itzurun-Strand ist das gesamte Paläozän aufgeschlossen. Diese Abbildung zeigt den Übergang von der Aitzgorri Limestone Formation (Danium-Stufe, Unteres Paläozän) zur Itzurun Formation (Selandium-Stufe, Mittleres Paläozän; die formale Basis des Selandium ist gelb markiert); nach SCHMITZ et al. (2011). Foto: © txakel – fotolia.com; Einfügungen durch den Verfasser.

- (1) Kreide/Paläogen-Grenzereignis (K/Pg),<sup>136</sup>;
- (2) mittel-paläozänes Ereignis (Early-Late Paleocene Event, ELPE);
- (3) Ereignis des thermalen Maximums an der Paläozän/Eozän-Grenze<sup>137</sup> (Paleocene-Eocene Thermal Maximum, PETM).

Anhand physikalischer Untersuchungen an den Sedimenten werden Datenreihen erzeugt und zyκλοstratigraphisch interpretiert. Die Ergebnisse werden mit dem ebenfalls zyκλοstratigraphisch interpretierten leicht zugänglichen (stratigraphisch gleichaltrigen) Steilküsten-Abschnitt in Zumaia (Abb. 28 und Abb. 29) verglichen.<sup>138</sup>

<sup>136</sup> Die Basis der Danium-Stufe (also auch von Paläozän, Paläogen, „Tertiär“ und Känozoikum) ist geochemisch definiert (MOLINA et al. 2006). Die signifikante Iridium-Anomalie an der Kreide/Paläogen-Grenze (K/Pg) wird dem Impakt auf der Yucatan-Halbinsel (Mexiko) zugeschrieben. Am Referenzpunkt (GSSP) bei El Kef (Tunisien) bildet die (definierte) Basis ein 1-3 mm dicker, rostfarbener Tonhorizont mit Nickel-reichen Spinellen und erhöhten Iridium-Werten.

<sup>137</sup> Die IUGS ratifizierte auf Vorschlag der ICS (Internationale Stratigraphische Kommission) erst kürzlich die Basis des Eozäns (AUBRY et al. 2007) in einem Aufschluss in der Nähe von Luxor (Ägypten). Dort ist die Basis der Ypresium-Stufe ebenfalls geochemisch definiert, einem signifikant negativen Ausschlag der Kohlenstoff-Isotopenkurve (carbon isotope excursion, CIE). Der Ausschlag wird als Ausdruck eines thermalen Maximums an der Paläozän/Eozän-Grenze (PETM, s. o.) interpretiert, einem globalen, kurzzeitigen Ereignis. Am Referenzpunkt (GSSP) bei Luxor beträgt dieser Abschnitt etwa 3 Profil-Meter.

<sup>138</sup> Am Zumaia-Profil (Nordspanien) sind von der IUGS in 2008 sowohl die Basis der Selandium-Stufe (Mittleres Paläozän) als auch die Basis der Thanetium-Stufe (Oberes Paläozän) formal genehmigt worden (SCHMITZ et al. 2011).

Bohrabschnitt	Leg 198			Leg 208		Leg 165	Leg 171B
Bohrregion	Shasky Rise, NW-Pazifik			Walvis Ridge, SE-Atlantik		Karibik	NW-Atlan.
Bohrlokalität (Site)	1209	1210	1211	1262	1267	1001	1050/51
Tiefe Meeresboden	2387 m	2573 m	2907 m	4755 m	4355 m	k. A.	k. A.
Bohrteufe (Paläozän)	218-262 m	207,5-246 m	126-147 m	139,5-217 m	231-320,5 m	k. A.	k. A.
Mächtigkeit Paläozän	44 m	38,5 m	21 m	66,5 m	89,5 m	k. A.	k. A.
Referenz-Profil	X			X			

**Tab. 19** Das Paläozän in ausgewählten Tiefseebohrungen.

Aufstellung nach Angaben von WESTERHOLD et al. (2008), Bohrteufe und Mächtigkeit sind Circa-Werte (aus ihrer Fig. 2). Die Mächtigkeit des Paläozäns schwankt zwischen etwa 21 und 90 m. Die Tertiärbasis unter dem Meeresboden befindet sich in Tiefen zwischen 147 und 321 m.

### **Methodik I: Untersuchungsgegenstand und Messreihen**

Generierung der Datenreihen (jeweils Variable zu Sedimenttiefe):

- Magnetische Suszeptibilität (MS): Messungen an Bord (durchgängig im 5-cm-Abstand) sowie im universitären Labor (an entnommenen Probenwürfeln im 10- bis 50-cm-Abstand (Leg 198) oder an ausgewählten Abschnitten (Leg 208)).
- Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF): Messung von Elementkonzentrationen; Abrasterung in 2-cm-Abständen (jeweils 1 cm<sup>2</sup>, 30 s). Eisen (Fe) zeigt das höchste Signal-zu-Rausch-Verhältnis.

Die Kurven der MS- und Fe-Wertereihe verhalten sich synchron. Die paläozänen Sedimentfolgen werden als vollständig (complete) angesehen.

### **Methodik II: Alters-zu-Tiefen-Beziehung, Tuning**

Alters-zu-Tiefen-Transformation: Korrelation (Zuweisung) ausgewählter (korrespondierender) Maxima der MS- bzw. Fe-Reihen auf die Maxima von 101 [theoretischen] E<sub>100</sub>-Zyklen (kurze Exzentrizität) (ihre Table S8, Datei mmc12). Für keines der fünf Sediment-Profile kann eine durchgängige Übertragung auf alle 101 [theoretischen] E<sub>100</sub>-Zyklen vorgenommen werden; die Übertragung des Zyklus Paleocene<sub>100</sub>32 beispielsweise erfolgt nur auf Site 1050 und Site 1001, weiteren Tiefseekernen, die wiederum mit Leg 198 und Leg 208 korreliert werden. Für Site 1262 (Referenz-Profil) werden für den als Paläozän definierten Abschnitt (Tiefe zwischen 216,71/216,00 m und 140,12 m) die 55 Ankerpunkte ausgewiesen, mit denen die Basis-Transformation Alter-zu-Tiefe durchgeführt wurde (ihre Table S9, Datei mmc13). Mit dieser Vorgehensweise wird die Sedimentationsrate von Punkt zu Punkt festgeschrieben und „variabilisiert“ (ihre Fig. 10).

Tuning: auf La2004 (LASKAR et al. 2004), kurze Exzentrizität.<sup>139</sup>

Konstruktion der astronomischen Zeitskala: mit langer Exzentrizität (0.002469 ± 0.0007 Zyklen pro 1000 [astronomische] Jahre), entspricht einer Periode von 405 k[a]a.

<sup>139</sup> WESTERHOLD et al. (2008, 391): „Hence, we decided to tune the best available record (Site 1262) the La2004 solution. Tuning was done by assigning ages of short eccentricity maxima to corresponding P<sub>C100</sub> peaks in Fe intensity as identified and labeled in the cyclostratigraphy (...).“

### Methodik III: Programme und Analysetechnik

Vorgehensweise: nach WEEDON (1993, 2003).

Datenaufbereitung: Trendeliminierung, Normalisierung.

Spektralanalyse: Wavelet (TORRENCE & COMPO, <http://paos.colorado.edu/research/wavelets>).

### Zyklostratigraphische Interpretation

Parallele Bänder in den Wavelet-Spektren (ihre Figs. F2 und F3) zeigen abschnittsweise ausgeprägte Frequenzen (Perioden), teilweise im Verhältnis 1:4. WESTERHOLD et al. interpretieren sie auf Basis der Bio- und Magnetostratigraphie und des zugrundeliegenden radiometrischen Altersrahmens als kurze und lange [theoretische] Exzentrizitätszyklen („can be related“).

Demzufolge werden bspw. für Site 1262 den Frequenzen von 0,81 bis 2,00 Zyklen pro Meter (Band 2; entspricht Zyklen etwa alle 0,5 bis 1,2 Profilmeter) der (theoretische) 100-k[a]a-Zyklus und den Frequenzen von 0,20 bis 0,45 Zyklen pro Meter (Band 1; entspricht Zyklen etwa alle 2,2 bis 5,0 Profilmeter) der (theoretische) 405-k[a]a-Zyklus zugeordnet (Tab. 20). Die einzelnen Grafiken (ihre Figs. F2 und F3) zeigen allerdings weitere Frequenzen (Sediment-Zyklen), in der Anzahl zwischen null und fünf variierend.

1	Abschnitt	Site 1262 (Basis Fe)				Site 1209 (Basis MS)			
		Frequenz (Zyklus/m)		Faktor 2/1	Weitere Frequenzen (Anzahl)	Frequenz (Zyklus/m)		Faktor 2/1	Weitere Frequenzen (Anzahl)
		Band 1	Band 2			Band 1	Band 2		
d	PETM - ELPE 1	0,20	0,81	4,1	-	0,38	1,57	4,1	1
b	PETM - ELPE 2	0,37	1,46	3,9	1-3	0,53	2,02	3,8	3-4
e	ELPE - K/Pg 1	0,29	1,26	4,3	3-4	0,43	2,27	5,3	4-5
c	ELPE - K/Pg 2	0,45	2,00	4,4	2-3	0,87	3,40	3,9	4
Interpretation		E <sub>405</sub>	E <sub>100</sub>			E <sub>405</sub>	E <sub>100</sub>		

**Tab. 20** Paläozäne Tiefseesedimente und ihre zyклоstratigraphische Interpretation.

Aufstellung nach Angaben von WESTERHOLD et al. (2008), insbesondere ihre Figs. F2 und F3 (Datei mmc2 und mmc3); die Buchstaben in Spalte 1 beziehen sich auf die jeweiligen Abschnitte, z.B. d = ihre Fig. F2d bzw. ihre Fig. F3d. Die abschnittsweise ausgeprägten Frequenzen, hier als Band 1 und Band 2 ausgewiesen, assoziieren die Autoren mit dem langen (E<sub>405</sub>) und kurzen (E<sub>100</sub>) [theoretischen] Exzentrizitätszyklus. Abschnittsbezeichnungen sowie Diskussion siehe Textteil.

Die klimatisch-induzierte Begründung der Zyklizität ist mehrstufig (S. 381): Die zyklische Natur der MS und des Fe-Gehaltes wird auf wechselnde Tonanteile des Sediments zurückgeführt („interpreted“). Diese Wechsel scheinen von Variationen in der Menge der Auflösung von Karbonat kontrolliert zu sein („appear to be controlled“). Variationen der ozeanischen Karbonat-Ionen-Konzentrationen in Milankovitch-Skalen und damit synchroner Veränderungen der Lysoklinientiefe<sup>140</sup> sowohl im Pazifik als auch Atlantik könnten von einer Expansion

<sup>140</sup> Lysokline bezeichnet die Wassertiefe, in welcher die erste Auflösung von Karbonaten erfolgt. Sie liegt zurzeit, örtlich sehr unterschiedlich, einige hundert Meter oberhalb der Kalzit-Kompensationstiefe, die Wassertiefe unterhalb welcher praktisch kein Kalzit erhalten bleibt (gegenwärtig zwischen 3.500 und 5.000 m).

und Kontraktion der Biosphärenproduktion in Response zu Änderungen der solaren Insolation getrieben sein („might be driven“).

### ***Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Autoren***

Mit der Identifizierung von exakt 24 langen [theoretischen] Exzentrizitätszyklen geben WESTERHOLD et al. für die Dauer des Paläozäns eine Zeitspanne von 9,72 Millionen [astronomische/radiometrische] Jahre an (zum Vgl. GTS2004: ca. 10,5 Millionen [radiometrische] Jahre). Mangels einer exakten Verankerung liefern sie für die (leicht) schwebende Chronologie drei Optionen für Beginn und Ende des Paläozäns, jeweils um einen langen [theoretischen] Exzentrizitätszyklus versetzt (Circa-Werte in Millionen [radiometrischen] Jahren, astronomisch feinkalibriert: 55,53 bis 65,28; 55,93 bis 65,68; 56,33 bis 66,08). Sie schreiben von einem Datierungsdilemma (dating dilemma), das unter bestimmten Umständen gelöst werden könnte. Dennoch passen ihre Tuning-Ergebnisse (ca. 55 bis ca. 66 Millionen [radiometrische] Jahre), wenn der Unsicherheitsbereich der radiometrischen Datierung mit betrachtet wird.

### ***Diskussion***

WESTERHOLD et al. reklamieren für sich, den langen [theoretischen] Exzentrizitätszyklus identifiziert zu haben.<sup>141</sup> Die vermeintliche Identifikation aber ist kein Nachweis, sondern lediglich eine Zuweisung (s. o., u. a. „can be related“). Es gilt festzuhalten, dass die spektralanalytisch ermittelten Periodizitäten für Site 1209 und 1262 nur abschnittsweise und dann auch nur teilweise in einem ungefähren Verhältnis von 1:4 auftreten. Darüber hinaus liegen bis zu fünf weitere Peaks unklarer Stellung vor. Diese „Zyklen“-Vielfalt in Verbindung mit Zuweisungen ausgewählter Maxima aus einer Vielfalt von insgesamt sieben Profilen zu 101 [theoretischen] E<sub>100</sub>-Zyklen zeigt den großen, zur Verfügung stehenden Spielraum bei dem Tuning-Prozess.

Dies wird auch im Weiteren deutlich bei der zyклоstratigraphischen Interpretation des Zumaia-Profiles. Dort gliedern WESTERHOLD et al. (ihre Fig. F4) für den unteren Teil des Paläozäns annähernd 46 kurze [theoretische] Exzentrizitätszyklen aus, vier mehr als DINARÈS-TURELL et al. (2003). Schließlich konstruieren HILGEN et al. (2010) auf Grundlage der gleichen Sedi-mentfolgen (Tiefseekerne und Zumaia) 25 (anstelle 24) lange [theoretische] Exzentrizitätszyklen für das Paläozän. In ihrer kritischen Evaluierung (critical evaluation) der zyклоstratigraphischen Interpretation von WESTERHOLD et al. wollen VANDENBERGHE et al. (2012)<sup>142</sup> ebenfalls 25 Zyklen erkannt haben. Als Startpunkt wählen sie ein Alter von 65,95 Millionen [radiometrische] Jahre<sup>143</sup> auf Basis datierter Aschenlagen unmittelbar über der K/Pg-Grenze in

<sup>141</sup> WESTERHOLD et al. (2008, 397): „For the first time it is possible to establish a complete astronomically calibrated stratigraphic framework covering the entire Paleocene epoch (~66 to ~55 Ma) which is based on the identification of the stable long-eccentricity cycle (405-kyr).“

<sup>142</sup> Co-Autor ist auch HILGEN.

<sup>143</sup> Rekalkuliertes <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar-Alter auf Basis eines neu definierten Alters für den FC-Standard (28,201 ± 0,046 Millionen [radiometrische] Jahre). „Die <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar-Technik ist eine relative Datierungsmethode; Alter werden

Zumaia. Daraus errechnet sich das Alter des PETM-Ereignisses zu ~56 Millionen [radiometrische] Jahre, astronomisch fein-getunt. Ein Tuning auf kurze Exzentrizitätszyklen, wie es WESTERHOLD et al. vorgenommen hatten, erachten sie für unrealistisch.

Schließlich ist das klimatische Modell von WESTERHOLD et al. zur Erklärung der spektralanalytisch ermittelten Zyklizitäten – erwartungsgemäß – auf Milankovitch-Zyklizität ausgerichtet. Das verhalten vorsichtige orbital-klimatische Design („might be“) aber ist rein spekulativ.

### **Systematik**

Zuweisung, Tuning.

### **Fazit**

WESTERHOLD et al. (2008) haben die Sedimentfolgen des Paläozäns zyκλοstratigraphisch und im Rahmen radiometrischer Alter interpretiert. Es zeigt sich – auch im Vergleich mit weiteren Bearbeitern –, dass die angewandte Methodik genügend Spielraum lässt, um unterschiedliche und damit jeweils gewünschte Segmentanzahlen (Zyklen) zu generieren, die eine Feinabstimmung im vorgegebenen radiometrischen Altersrahmen erlauben.

## **5.12 Zyklische Sedimentation in den neogenen Braunkohlevorkommen des Ptolemais-Beckens (Griechenland)?**

### **Titel**

TOUGIANNIDIS (2009): Karbonat- und Lignitzyklen im Ptolemais-Becken: Orbitale Steuerung und suborbitale Variabilität (Spätneogen, NW-Griechenland). Sedimentologische Fallstudie unter Berücksichtigung gesteinsmagnetischer Eigenschaften.

### **Lithostratigraphie, Untersuchungsgebiet**

Komnina- bis Ptolemais-Formation; Florina-Ptolemais-Kozani/Servia-Graben, Übertage-Aufschlüsse Lava, Vegora und Achlada sowie Bohrung KAP-107 aus dem Amynteon-Subbecken (bei Ptolemaida und Kozani, Nordgriechenland).

### **Stratigraphisches Alter**

Obermiozän bis Oberpliozän.

### **Beschreibung und Relevanz**

TOUGIANNIDIS' (2009, 100) wesentliches Anliegen „(...) ist die Ergründung der Steuerungsfaktoren der Karbonat-Lignit-Schichtungsrythmen“ im Ptolemais-Becken.<sup>144</sup>

---

zurück referenziert auf einen Mineral-Standard ‚bekanntes‘ Alters“ (JOURDAN et al. 2014, 2). Der FC-Mineral-Standard bezieht sich auf Minerale des Fish Canyon Tuff (FCT) in Colorado (USA).

<sup>144</sup> Die Braunkohle (Lignit) mit variierenden Heizwerten von 1.800 bis 4.700 kcal/kg wird teilweise abgebaut.

Die (aufgeschlossenen) obermiozänen Lignitablagerungen „bestehen z. T. aus Stubben, Ästen und kleineren Holzfragmenten, welche eine Wechsellagerung mit anorganischen Silt-Ton-Mergel Horizonten im dm-Bereich aufweisen.“ Die bis 280 m mächtigen Ablagerungen der Komnina-Formation werden als limnodeltaisch (Lava-Sektion) bzw. lakustrin/fluviatil (Vegora-Sektion) interpretiert.

Bei den pliozänen Ablagerungen der Ptolemais-Formation „handelt es sich um dünne, zum Teil bis zu mehrere dm mächtige braune bis schwarze lignitische Horizonte, die eine Wechsellagerung mit Mergeln, Tonen und Tonmergeln aufzeigen.“ Die auffälligen Hell-Dunkel-Abfolgen werden auch als „Zebraschichtung“ bezeichnet. Bereits makroskopisch, so TOUGIANNIDIS (S. 7), lasse diese Hell-Dunkel-Rhythmik eine orbitale bis suborbitale Steuerung vermuten.

Das stratigraphische Zeitgerüst der Sedimentfolgen basiert auf bio- und magnetostratigraphischen (Eigen-) Untersuchungen sowie der Übertragung (Korrelation) radiometrischer Alter, mit Ausnahme einer in der Vegora-Sektion vorkommenden und datierten vulkanischen Aschenlage.

### **Methodik I: Untersuchungsgegenstand und Messreihen**

Datengenerierung: Gewinnung sog. Proxy-Daten durch Messungen am Sedimentgestein und an entnommenen Sedimentgesteinsproben:

- Photospektrometrie: Beprobung in (1?)-cm-Intervallen; Variablen: L\* (Helligkeit, Grauwert), a\* (rotgrün), b\* (blaugelb), C\* (Buntheit), h (Farbtonwinkel).
- $\gamma$ -Szintillometrie ( $\gamma$ -Ray-Log, GR): Aufschlussmessungen mit Handsonde in 6-cm-Intervallen.
- Magnetische Suszeptibilität (MS): Aufschlussmessungen mit Handapparat in 6-cm-Intervallen.

Profile und Profilmeter: Kernbohrung KAP-107, etwa 99 m, Teufenabschnitt ~140–~230 m; Sektion Lava, 65 m; Sektion Vegora, 67 m.

### **Methodik II: Alters-zu-Tiefen-Beziehung, Konstruktion der Zeitreihen, Tuning**

Generierung der Primär-Zeitreihen (Alters-zu-Tiefen-Transformation):  $\emptyset$  Sedimentationsraten (Tab. 22); abgeleitet von der Polaritätszeitskala (radiometrisch geeicht).<sup>145</sup>

Tuning-Zielkurven: [Theoretische] Insulations- (Sommer, 40° nördliche Breite), Obliquitäts- und Exzentrizitätszeitreihe; Daten nach LASKAR et al. (2004).

Getunte Reihen:

- Sektion Lava: C\*-, L\*- und MS-Reihen.
- Sektion Vegora: L\*- und GR-Reihen.

<sup>145</sup> Zur Generierung der Zeitreihen (Alters-zu-Tiefen-Transformation) konstruiert TOUGIANNIDIS für den gesamten untersuchten Abschnitt eine (chronostratigraphische) Zeitskala. Hierfür überträgt er drei (bereits bekannte) radiometrische Alterswerte als Ankerfixpunkte. Zur weiteren Skalierung verwendet er die Polaritätszeitskala, indem er dem erstellten magnetostratigraphischen Profil (Inklination/Deklination) und den Abschnitten mit normaler Polarität passende Chronen (z. B. für die Vegora-Sektion Chron C3An.1n, Basis 6,25/Top 6,03 Millionen [radiometrische] Jahre) zuweist.

- Bohrung KAP-107: h-, L\*- und a\*-Reihen.

Tuning-Prozedere: Teilweise auf Basis geglätteter Kurven (Primär-Zeitreihen?); Erzeugung (Bestimmung) von (Tuning-) Fixpunkten „innerhalb der paläomagnetischen Grenzen“, denen bspw. Insolationsmaxima oder -minima zugewiesen werden. Die Anzahl der Fixpunkte variiert zwischen 14 und 30.

### **Methodik III: Programme und Analysetechnik**

Spektralanalyse: Periodogramm (Lomb-Scargle; LOMB 1976, SCARGLE 1982, 1989), ESA.

Programme: AnalySeries (PAILLARD et al. 1996), ESALab (REINSCH 2008), Redfit (SCHULTZ & MUDELSEE 2002).

### **Ergebnisse und Schlussfolgerungen des Autors**

Für TOUGIANNIDIS (S. 105) zeichnen die Karbonat- und Lignitwechselfolgen signifikante Zyklizitäten nach. Die errechneten Frequenzspektren zeigen einerseits höherfrequente Anteile unbekannter Genetik (als Submilankovitch-Zyklen bezeichnet) und andererseits einen Frequenzinhalt, der „(...) eine relativ gute Parallelisierung zu den extrinsisch gesteuerten Milankovitch-Zyklen erlaubt.“ Und zuvor schreibt er: „Die orbitale Präzession (P1, P2, P3), welche den sog. Bündeln-Zyklen entspricht, wird durch Sedimentmächtigkeiten von ~1 – 4 m abgebildet. Die niederfrequenteren Anteile (Großzyklen), die durch eine Frequenz von 51 – 39 ka (O3 und O1) und 95.9 – 99.5 und 128.2 ka (E1 und E2) dominiert werden, entsprechen der orbitalen Obliquität und Exzentrizität. Die Sedimentmächtigkeiten schwanken zwischen ~5 – 20 m.“<sup>146</sup>

Das Ergebnis der Spektraluntersuchung belege eine rein klimatisch-limnologische Steuerungsgenetik. Für die regionale Klimavariabilität führt TOUGIANNIDIS (S. 105) als Ursache ein „(...) Zusammenspiel von geographischer Lage, direkter Nähe zum Ozean und vor allem den Niederschlagsmengen“ an.

### **Diskussion**

TOUGIANNIDIS geht von der Wirklichkeit einer Orbitalsteuerung der Sedimentation aus<sup>147</sup>.

Aufgrund rechnerisch ermittelter durchschnittlicher Sedimentationsraten (radiometrische Rahmenalter) führt er eine Erstzuweisung von Sedimentzyklen zu den theoretischen Milankovitch-Zyklen durch. Die Graphen der getunten Zeitreihen zeigen – TOUGIANNIDIS zufolge – im Vergleich mit den Tuning-Zielkurven einen in der Regel ähnlichen Verlauf. Werden seine Abb. 60 a-d, 61 a-b, 63 a-c, 64 a-b und 67 a-d aber genau betrachtet, kann diese Fest-

<sup>146</sup> TOUGIANNIDIS bezieht sich auf folgende [theoretische] Milankovitch-Perioden (nach SCHWARZACHER 1993): Exzentrizität (E3/E2/E1 mit 128,2/99,5/94,9 k[a]a); Obliquität (O3/O2/O1 mit 53,6/41/39,7 k[a]a) und Präzession (P3/P2/P1 mit 23,7/22,4/18,9 k[a]a).

<sup>147</sup> „Die Variation der orbital gesteuerten Milankovitch-Zyklen (Präzession und Exzentrizität, Abb. 10) nach Daten von Laskar (1990) äußern sich auf das Sedimentationsgeschehen durch die periodischen Abweichungen der Solarkonstante. Im Folgenden wird dieses zyklische Verhalten innerhalb der Ptolemais- und Komnina Formation durch die Anwendung spektralanalytischer Verfahren näher untersucht“ (TOUGIANNIDIS 2009, 49).

stellung einer Ähnlichkeit nur punktuell, aber nicht generell nachvollzogen werden. Dies spiegelt sich im Tuning-Ergebnis wieder. Den Varianzspektren der getunten Zeitreihen der von TOUGIANNIDIS ausgewählten 12 Abschnitte (zusammengefasst in Tab. 21) können nur vereinzelt Werte entnommen werden, die den Perioden der konkreten theoretischen Milankovitch-Zyklen „entsprechen“: 1 x E1, 1 x E3, O3 (?), 2 x O2/O1, Vielfalt an P's und Quasi-P's (aber nur bei 7 von 12 Analysen). Darüber hinaus liegen zahlreiche Peaks vor, die nicht Milankovitch-Periodizitäten zugeordnet werden können. In Kenntnis dieses Mangels abstrahiert TOUGIANNIDIS die Summe seiner Ergebnisse zu einer „Bandbreiten-Korrelation“ mit der Kernaussage, dass insgesamt (über alle 3 Profile mit je 4 Zeitreihen und ausgewählten Variablen) das Milankovitch-Spektrum abgedeckt sei.<sup>148</sup> Insofern ist das Tuning nur punktuell und nicht konsequent vollzogen worden (vgl. HAYS et al. 1976).

Zuordnung zu den theoretischen Milankovitch-Zyklen		Spektralanalysen (Profile, Variablen, Abschnitte in Mio. radiometrische Jahre), Tabellenwerte (k[r]a)											
		Lava				Vegora				KAP-107 Kernbohrung			
		MS 6,5- 6,9	C* 6,5- 6,9	MS 6,7- 6,8	C* 6,6- 6,7	L* 6,0- 6,5	GR 6,0- 6,5	L* 6,1- 6,2	GR 6,0- 6,2	a* 3,7- 4,2	b* 3,3- 3,6	L* 4,8- 5,2	h 3,8- 4,0
Exzentrizität	E3?	184,1											
	E3						137,6						
	E1?								108,7	108,1			
	E1			93,6									
keine Zuordnung		65					77				63,5	66,7	
Obliquität	O3?		50	50,4			50			49,1			
	O2/O1								38,6		40,4		
keine Zuordnung					31,9		32			31,8		34,8	
Präzession			25	24,3		24,6				26,2	25,7	27,8	22
			20	19,9						21,8	18	17,8	
			16	17,3						18,8			
Sub-Milankovitch-Zyklen		1,8		12,1	12,3	15,6	3,5	11,4	2,7	15,3	13,9	13,5	15,9
		1,4	9,1	10,4	7,3	13,2		7	2,5	12,5	9,8	5	13,1
		1,2	6,9	9,5	4,6	11,3		5,3	1,8	7,8	7,7		9,3
		1	5,5	7,3	3,6	10,3		4,4	1,7	6,6	6,8		6,1
		0,99	4,5	6,6	3,1	8,7		3	1,3	5,4	5,1		5
		0,87	3,8	6,1	2,7	7,5		2,5	1,1	4,5			
		0,78	3,7	5,2	2,5	6,5		1,9	0,98	3,6			
			3,4		2,3	5,8		1,8	0,91				
			(...)		(...)			(...)	(...)				

**Tab. 21** Spektrale Analyse neogener Sedimentfolgen (Ptolemais-Becken, Griechenland).

Zyklostratigraphische Interpretation der Karbonat-Lignit-Schichtungsrythmen. Spektralanalyse von 12 getunten Zeitreihen und Zuweisung ausgewählter Sediment-Zyklen (Perioden) zu den theoretischen Milankovitch-Zyklen (Diskussion siehe Textteil). Zusammengestellt nach TOUGIANNIDIS (2009), seine Abb. 62 a-d (Sektion Lava), 66 a-d (Sektion Vegora) und 68 a-d (Bohrung KAP-107). Legende: Variablen (MS, C\* etc.) siehe unter Methodik; (...) = weitere Zyklen, die nicht in die Tabelle aufgenommen wurden.

<sup>148</sup> Insofern ist das in Abschnitt „Ergebnisse und Schlussfolgerungen des Autors“ aufgeführte Zitat, das die Periodenspannen nennt (siehe Fußnote 146), irreführend. Es entsteht der Eindruck, als seien dies die Ergebnisse selbst.

Hauptsächlich weisen die Varianzspektren der getunten Zeitreihen Peaks  $<16$  k[r]a aus; diese bezeichnet (interpretiert) TOUGIANNIDIS als Sub-Milankovitch-Zyklen. Allerdings ist ihre Anzahl teilweise sehr hoch; so bspw. für die C\*-Reihe der Sektion Lava (Tab. 21)<sup>149</sup>: Perioden(dauer) von 12,3/7,3/4,6/3,1/2,7/2,5/2,3/1,9/1,7/1,6/1,4/1,3/1,2/1,0 k[r]a; entsprechen umgerechnet Sedimentzyklen mit Perioden von 189/112/71/48/42/39/35/29/26/25/22/20/18/15 cm (Sedimentationsrate siehe Tab. 22). Bei dieser Zyklendichte im Zentimeter- und Dezimeter-Bereich kann nicht davon ausgegangen werden, dass eine Real-Sedimentation abgebildet wird.<sup>150</sup> Dies lässt darauf schließen, dass Zyklen durch Maßnahmen der Datenaufbereitung (z. B. Homogenisierung) oder Datenweiterbearbeitung (z. B. Glättung) systemisch generiert worden sind.

Profil	Ø Sedimentationsrate [cm/k[r]a]	durch Tuning variabilisierte Sedimentationsrate [cm/k[r]a]	zu theoretischen Milankovitch-Zyklen zugewiesene Ø Sediment-"Zyklen" (Perioden)			
			E	O	P	Sub-MZ
Sektion Lava	15,4	5-37	15 m	6 m	3 m	
Sektion Vegora	20,5	13-17 (?)	20 m	8 m	4 m	
KB KAP-107	4,8	k. A.	5 m	2 m	1 m	
Zyklusmodell			5-20 m		1-4 m	4-20 cm

**Tab. 22** Sedimentationsraten und Zyklusmodell (Ptolemais-Becken, Griechenland).

Konstruktion einer hierarchischen Beziehung zwischen den Lignit-Mergelton-Sandhorizonten (Basal-Zyklus, 4-20 cm, etwa 0,25-1 k[r]a, Sub-MZ) und den theoretischen Milankovitch-Zyklen, insbesondere Präzession (Bündel von Basal-Zyklen, 1-4 m, etwa 25 k[r]a; Kleinzyklen) und Exzentrizität (Bündel von Präzessions-„Zyklen“, 5-20 m, etwa 100 k[r]a, Großzyklus). Diskussion siehe Textteil. Zusammengestellt nach TOUGIANNIDIS (2009), u. a. seine Abb. 69. Legende: Sub-MZ = Sub-Milankovitch-Zyklen.

Es stellt sich die Frage, ob überhaupt eine zyklische Sedimentation vorliegt. Die spektralanalytisch ausgewiesenen „Zyklen“ der (getunten) 12 Proxy-Daten-Zeitreihen, die nach TOUGIANNIDIS größtenteils hochsignifikant sind (SL > 99 %), zeigen im niedrigfrequenten Bereich keine Konzentration auf Milankovitch-Periodizitäten, und im hochfrequenten Bereich sind sie mehr als fraglich. Die Interpretation der Ergebnisse würde eher eine episodische,

<sup>149</sup> Die Sedimentfolge in Lava war bereits von STEENBRINK et al. (2000) zylostratigraphisch interpretiert worden. Die spektralanalytische Auswertung ihrer GR-Reihe (187 Messwerte) von Profilmeter ~20 bis ~115 m wird von zwei Peaks (Sedimentzyklen) mit Perioden von 5,3 m und 3,1 m dominiert (ihre Fig. 2, Gesamtlänge 130 m; ihr Profilabschnitt 16-78 m entspricht etwa dem Gesamtprofil von TOUGIANNIDIS, 0-62 m). Diese entsprechen der zuvor durchgeführten makroskopischen Einteilung, der Zuweisung von 15 Zyklen über Teilabschnitte des Profils (im Bereich 20-60 m 7 Zyklen mit einer Dicke von  $\varnothing 5,1 \pm 0,7$  m und im Bereich 90-120 m 8 Zyklen mit unterschiedlichen Dicken von  $3,3 \pm 0,6$  m, ~3,3 m und 2,3 m). Sie weisen sowohl den „dicken“ als auch den „dünnen“ Zyklen den theoretischen Präzessionszyklus zu, 19,9 k[a]a bzw. 22,8 k[a]a. Über diese Kalibrierung ergeben sich Sedimentationsraten von 23 cm/k[a/r]a für den Abschnitt  $\leq 60$  m und 16 cm/k[a/r]a für den Abschnitt  $> 60$  m, die im Einklang stehen mit der Gesamtdauer der Abfolge (ihre Tabelle 1). Die vorgenommene Zuweisung allerdings führt zu einem Zirkelschluss, wenn sie behaupten, dass die Spektralanalyse den astronomischen Ursprung der Zyklen bestätigen würde (S. 161): „The astronomical origin of the cycles is confirmed by the results of spectral analyses of gamma-ray and susceptibility time series.“ – TOUGIANNIDIS weist für dieses Profil keine GR-Messungen aus. Seine MS-(Gesamt)Zeitreihe (Tab. 21) zeigt keine Peaks im Spektralbereich des theoretischen Präzessionszyklus, dagegen aber die C\*-Zeitreihe und die MS-(Detail)Zeitreihe. Im Vergleich zu STEENBRINK et al. (2000), die einen Sedimentzyklus von etwa 5,3 m aufzeigen – nur die jeweils unteren Teile der Lava-Profile sind vergleichbar –, gibt TOUGIANNIDIS Sediment-Zyklen mit einer Dicke von etwa 3 m an und darüber hinaus bis zu 14 weitere mit Dicken von 15 bis 189 cm.

<sup>150</sup> Hier wäre eine Spektralanalyse der (unveränderten) Rohdaten wünschenswert.

eventuell auch eine chaotische Sedimentation anzeigen.<sup>151</sup> Unter dieser Voraussetzung ist TOUGIANNIDIS' hierarchisches Zyklenmodell (seine Abb. 69, Tab. 22) mit Basiseinheiten von 4-20 cm und Bündelungen im Bereich von 1-4 sowie 5-20 m scheinbar eine der Zyklostratigraphie geschuldete reine theoretische Konstruktion; er unternimmt auch nicht den Versuch, sein Zyklenmodell auf die konkrete Sedimentfolge zu übertragen.

Schließlich unterliegt TOUGIANNIDIS (S. II) – wie auch STEENBRINK et al. (2000)<sup>152</sup> – einem Zirkelschluss<sup>153</sup>, wenn er glaubt, dass spektralanalytisch ausgewiesene „Zyklen“ (bzw. die Spektralanalyse) eine Orbitalsteuerung (Milankovitch-Zyklen) beweisen<sup>154</sup>: „Spektralanalysen von Klimadaten belegen, dass die Schiefe der Ekliptik und die Präzession die saisonal-räumliche Verteilung der Insolation beeinflussen (Berger, 1988).“

### **Systematik**

Zuweisung, Tuning.

### **Fazit**

TOUGIANNIDIS (2009) hat den Versuch unternommen, photospektrometrische und geophysikalische Datenreihen (sog. Proxy-Daten) – unter Zugrundelegung eines radiometrischen Altersrahmens – auf theoretische Milankovitch-Zyklen zu tunen. Er hat weder den Nachweis einer zyklischen Sedimentation noch einer orbitalen Steuerung erbracht.

---

<sup>151</sup> Hinsichtlich der Genese der Braunkohlenlager geht TOUGIANNIDIS von einer konventionellen Vorstellung aus. Zu Recht misst er den orogenetischen Vorgängen eine entscheidende Bedeutung zu, der „(...) Entstehung von Senken innerhalb derer es anschließend zu einer Akkumulation von organischer und/oder anorganischer Substanz gekommen ist.“ Den autochthonen Charakter der Kohlen leitet er ausschließlich von „in-situ vorkommenden Stubben“ (S. 94, obermiozäne Lava-Profil) sowie „Stubben und mehrere in-situ Stämme“ (S. 96, Achlada-Abfolge) ab. Die beschriebenen Lagerungsverhältnisse der Stubben und (unvollständigen) Stämme in dieser regional-bedeutenden Senke (als Sediment-Depot-Zentrum) können auch allochthoner (antransportiertes Material) Natur sein. Dies würde eine episodische Sedimentation unterstreichen.

<sup>152</sup> Siehe Fußnote 149.

<sup>153</sup> Auch TOUGIANNIDIS' „Verifizierung der Zyklenanalyse“ (nachfolgendes Zitat) mündet in einen Zirkelschluss. Die Sedimentationsraten können nur im Kontext des (vorgegebenen) radiometrischen Altersrahmens variieren; die mit diesem Basis-Input getunten Zeitreihen sind nicht unabhängig, die Zyklenanalyse kann nicht mit den getunten Zeitreihen selbst verifiziert werden: „Die hieraus resultierende Zeitreihe liefert nicht nur Informationen über etwaige dominierende orbitale Steuerungsmuster innerhalb der späteogenen Hell-Dunkel-Rhythmen der Ptolemais-Senke, sondern auch über vorherrschende Sedimentationsraten, welche einen wichtigen Faktor für die Verifizierung der Zyklenanalyse darstellen“ (TOUGIANNIDIS 2009, 81).

<sup>154</sup> Die Beweis-Absicht: „(...) werden die vorliegenden Untersuchungen auf den Beweis orbitaler- und vor allem suborbitalgesteuerter Mechanismen in den Hell-Dunkel-Rhythmen des Florina-Ptolemais-Kozani/Servia-Grabens erweitert“ (TOUGIANNIDIS 2009, 1).

## 5.13 Überlieferung einer zyklischen Vegetationsvariabilität im Messeler Ölschiefer?

### **Titel**

LENZ et al. (2011): Short-term fluctuations in vegetation and phytoplankton during the Middle Eocene greenhouse climate: a 640-kyr record from the Messel oil shale (Germany). [*Kurzzeit-Fluktuationen der Vegetation und des Phytoplanktons während des mitteleozänen Treibhausklimas: Eine Überlieferung von 640.000 Jahren vom Messeler Ölschiefer (Deutschland).*]

### **Lithostratigraphie, Untersuchungsgebiet**

Mittlere Messel-Formation; Grube Messel (NE Darmstadt, Hessen), Forschungsbohrung (FB) Messel 2001.

### **Stratigraphisches Alter**

Mittleres Eozän; nach LENZ et al. (2014): Unteres Eozän (oberstes Ypresium) und Mittleres Eozän (unterstes Lutetium).

### **Beschreibung und Relevanz**

LENZ et al. deuten palynologische Stichproben der Mittleren Messel-Formation im Rahmen eines angenommenen saisonalen Sedimentationsmodells mit einer „warvenähnlichen“ Jahresschichtung<sup>155</sup> und demzufolge einer angenommenen Bildungsdauer von 640.000 [„Warven“-] Jahren<sup>156</sup>.

Die zeitliche Skala ihrer Studie sollte jedwede Zyklen und Trends innerhalb der Spanne des klassischen [theoretischen] Milankovitch-Frequenzbandes auflösen (aufzeigen), wie sie durch die den Messel-See umgebende Vegetation reflektiert wird.<sup>157</sup>

### **Methodik I: Untersuchungsgegenstand und Messreihen**

Forschungsbohrung Messel 2001, Abschnitt von Tiefe 3,08 bis 94,60 m: Probenauswahl im Abstand von 0,2 m (des in 10-cm-Intervallen und 1-cm-Scheiben beprobten Kerns); Σ 458 (palynologische) Proben.

Datenvor- und Datenaufbereitung: Limitierung der >97 Spezies (Palynomorphen<sup>158</sup>) auf 52 Variablen (Familie, Gattung, oder individuelle Spezies), dabei Ausschluss von (selten vorkommenden) Taxa.

<sup>155</sup> „We therefore accept annual stratification as the basis for the time scale in our analyses and assume continuous sedimentation at a constant rate throughout our study interval“ (LENZ et al. 2011, 1853).

<sup>156</sup> Zum Sedimentationsmodell und zur Bildungsdauer siehe Abschnitt Diskussion.

<sup>157</sup> Mit Ausnahme des langen [theoretischen] Exzentrizitätszyklus: „Thus, except for long eccentricity with a period of 400 kyr the temporal scale of our study should resolve any cycles and trends within the range of the classical Milankovitch frequency band as reflected by the vegetation surrounding the Messel lake“ (LENZ et al. 2011, 1858).

<sup>158</sup> Der Begriff umfasst Pollen, Sporen sowie (pflanzliche und tierische organisch-wandige) Mikrofossilien.

### **Methodik II: Alters-zu-Tiefen-Transformation, Konstruktion der Zeitreihen**

Generierung der Zeitreihen (Alters-zu-Tiefen-Transformation):  $\emptyset$  (kontinuierliche) Sedimentationsrate von 0,14 mm pro [Warven-] Jahr (nach SCHULZ et al. 2002<sup>159</sup>); 20 cm entsprechen etwa 1.400 [Warven-] Jahren, 91,6 m entsprechen etwa 640.000 [Warven-] Jahren; weitere Verringerung der Taxa durch Ausschluss der Algen.

Datenverfügbarkeit: Ihre SM Table (vollständige Zeitreihen aller acht Cluster); Datenverwendung durch den Verfasser (s. u.).

### **Methodik III: Programme und Analysetechnik**

Erstellung der Pollendiagramme: PanPlot 10.16; Regression gewichteter Durchschnitte (TRAN 1.81); Pollen und Sporen ergeben jeweils 100 % (10-20 % der Gesamt-Vergesellschaftung kann nicht identifiziert werden).

Zonierung und Zonenmodellierung: PSIMPOLL 4.10, Aufgewichtung der selten vorkommenden Taxa gegenüber den reichlich vorkommenden (Pollenspektrum wird dominiert von *Plicatopollis plicatus*, *Tricolpopollenites liblarensis* und *Tricolporopollenites cingulum*).

Numerische Aufbereitung: PAST 1.67, u. a. Clustering zu acht Gruppen.

Spektralanalyse: REDFIT 3.8.; Wavelet: <http://atoc.colorado.edu/research/wavelets/>, Methodik nach TORRENCE & COMPO (1998).

### **Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Autoren**

LENZ et al. beschreiben das Pollenspektrum des untersuchten Kernabschnitts als relativ einheitlich (relatively uniform).<sup>160,161</sup> Die Stabilität der Klimax-Vegetation bestätige sich dadurch, dass weder ein erstes noch letztes Auftreten eines Pollentaxon in der Gesamtheit der

<sup>159</sup> Bezieht sich auf folgende Aussage: „Über einen sehr langen Zeitraum herrschten extrem ruhige Bedingungen mit minimalen Sedimentationsraten. Die Dauer dieser Entwicklung kann mittels einer Frequenzanalyse von Bohrlochmessungen (in diesem Fall Dipmeter, Suzeptibilität und Gamma Ray) abgeschätzt werden. Unter der Voraussetzung von tektonisch ungestörten Verhältnissen, konstanten Ablagerungsbedingungen und der Gültigkeit der Variation der Erdparameter (Milankovitch-Zyklen) sowie unter Vernachlässigung der Kompaktion berechnet WONIK (pers. Mitt.) für den Bereich von 4-94 m eine durchschnittliche Sedimentationsrate in der Größenordnung von 0,14 mm/a“ (SCHULZ et al. 2002, 14). – Leider wird nicht mitgeteilt, wie die Alters-zu-Tiefen-Transformation vorgenommen wurde. Denn ohne eine Zeitreihe kann keine zeitbezogene Frequenzanalyse durchgeführt werden. Analog EL BAY et al. (2001), siehe Abschnitt 5.8, wird als primäre (von WONIK genutzte) Input-Größe die von GOTH (1990) Warven-kalibrierte Sedimentationsrate von etwa 0,15 mm pro [Warven-] Jahr angenommen; dementsprechend werden die Alter in [Warven-] Jahre ausgedrückt.

<sup>160</sup> „In order to detect any underlying trend of palaeoecological significance in the relatively uniform pollen spectra, the ‚optimal splitting by information content‘ (OSIC; BENNETT 2005) is used here to establish a robust zonation“ (LENZ et al. 2011, S. 1858).

<sup>161</sup> Ein „relativ einheitliches Pollenprofil“ hatte zuvor bereits THIELE-PFEIFFER (1988, 74) für die Bohrung 4 (1980) festgestellt: „Die Eintönigkeit des Pollenniederschlags im ganzen Profil (Bohrung 4) belegt zunächst, dass diese Waldgesellschaft sich in der ganzen Zeit, während der Messeler See bestand, nicht verändert hat. Sie deutet zweitens auf einen relativ kurzen Ablagerungszeitraum der Seesedimente (und somit des Ölschiefers) hin.“ Auch hinsichtlich der quantitativen Auswertung „ergab sich für das ganze Profil ein sehr gleichförmiges Bild.“ – Die Bohrung 4 wird dem Randbereich des Beckenzentrums zugerechnet und ist knapp 200 m von dem Bohrpunkt der FB 2001 entfernt (LIEBIG 2001).

Proben beobachtet wurde. Eine Variabilität bestehe (lediglich) in der Häufigkeitsverteilung der Pollen zueinander.

Im Kontext der angenommenen langen Zeitskala interpretieren sie die Vegetationsvariabilität – ohne ein Indiz für eine dauerhafte Veränderung der Temperatur – als graduellen Klimawechsel von „nassen“ und humiden Konditionen (frühe Phase) über eine Übergangsperiode zu weniger humiden Konditionen (späte Phase).

Die Zeitreihen-Analyse zeige deutlich eine zyklische Variation in der quantitativen Zusammensetzung der palynomorphen Vergesellschaftungen. Die beobachteten Zyklen korrespondieren genau (closely correspond) mit den Perioden der [theoretischen] kurzen Exzentrizität, Obliquität und Präzession (siehe Tab. 23). Sie schließen daraus, dass der orbitale Antrieb des Klimas die terrestrische Vegetation, die sich in dem Pollen-Niederschlag widerspiegelt, während der Treibhaus-Periode des mittleren Eozän ausreichend beeinträchtigt habe.<sup>162</sup>

Cluster	Abschnitt [k[W]a]	Theoretische Milankovitch-Zyklen (Zuweisung)				"Sub-Milankovitch-Zyklen" [k[W]a]	Anzahl weiterer Peaks
		E [k[W]a]	O [k[W]a]	P (lang) [k[W]a]	P (kurz) [k[W]a]		
1	0-640		49, 35	28	20,5		12
	0-270		39		17		8
2	0-640	60 (?)	34	24	19,6	? (8,8; 7,4; 3,6)	10
	200-580	60 (?)	36	24		? (8,5; 4,9; 3,6)	10
3	0-640	135	40	25	20,5	? (6,8; 4,2)	16
	150-550	87	40	29	21*	? (6,8; 4,2)	15
4	0-640		41, 32		21	? (8,3)	14
	150-400		46		19		4
5	0-640		47	23			11
	250-640	100 [1]	49	23			9
6	0-640	125	43	27*	21*	? (5,8; 4)	12
	420-640		42	22		4	6
7	0-640		58 (?)	28	19	? (6,8; 4,1)	11
	0-300		37 (?)		20	? (6,8; 4,2)	6
8	0-640	106	41	25,5	20,5		11
	170-370		47	28		? (5,8)	6

**Tab. 23** Palynomorphen-Cluster und zyκλοstratigraphische Interpretation (Messel).

Ergebnisse der Spektralanalysen und Zuweisung von „Palynomorphen-Zyklen“ zu den theoretischen Milankovitch-Zyklen; Diskussion siehe Textteil. Zusammenstellung nach LENZ et al. (2011), ihre Figs. 10-13 und ihre SM-Figs. 2-5, Redfit-Analysen, jeweils Circa-Werte; ? sind übernommen. Legende: \* = Peaks unterhalb der Linie AR(1), [1] = Redfit-Analyse des Verfassers: 129,9 k[W]a (0,0077 Zyklen/k[W]a). Die Anzahl weiterer Peaks bezieht sich auf den Frequenzbereich >0,06-0,35 Zyklen/k[W]a und  $\geq$  AR(1).

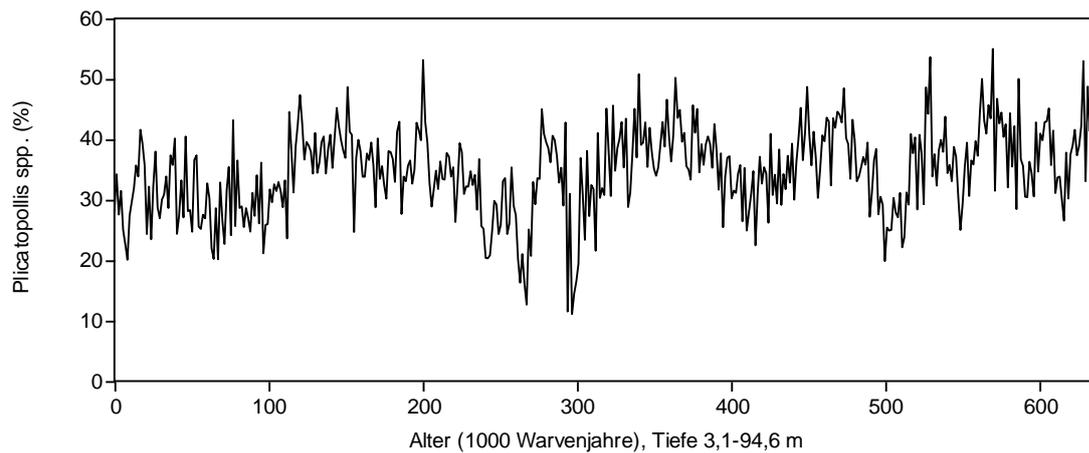
<sup>162</sup> „Our time series analyses clearly show cyclic variation in the quantitative composition of palynomorph assemblages during a 640-kyr interval of the Middle Eocene as represented by 91.6 m of laminated oil shale of the Middle Messel Formation. The observed cycles closely correspond to the short eccentricity, obliquity and precession periods and to some extent to sub-Milankovitch periods. We, therefore, conclude that orbital forcing of climate affected the terrestrial vegetation sufficiently during the Middle Eocene greenhouse phase to be reflected in the pollen rain“ (LENZ et al. 2011, 1869-70).

## Diskussion

Für die Interpretation der Varianzspektren sind folgende ergänzende Feststellungen von Bedeutung:

Lomb-Periodogramme (Gesamtprofil) zeigen für die relevanten Frequenzen zwischen  $>0,008$  und  $0,06$  Zyklen pro 1000 [Warven-] Jahre, das entspricht rückgerechnet Perioden von etwa 18 bis 2,4 m, nur für 3 der 8 Datenreihen Peaks über dem unteren Signifikanz-Level von 0,05 (Anzahl in Klammern): Cluster 2 (1), Cluster 5 (2) und Cluster 8 (4) (Abb. 32; Cluster 7 Abb. 35). Die zu diesen Clustern vorgenommene Ausschnittsbetrachtung erhöht insgesamt die Anzahl der Peaks nicht. Sie erhöht die Anzahl der „markanten“ Peaks für Cluster 2 (von 1 auf 3), erniedrigt sie aber für Cluster 8 (von 4 auf 1); Cluster 5 ist unverändert.<sup>163</sup>

Die zugehörigen Wavelet-Darstellungen zeigen keine ausgeprägten und durchgängigen Bänder, nur abschnittsweise deuten horizontale Bereiche Periodizitäten an (vgl. Abb. 31 und Abb. 36). Der Vergleich mit den Wavelet-Darstellungen von LENZ et al. lässt ähnliche Grundmuster erkennen, die Ausprägung im Detail aber ist unterschiedlich.



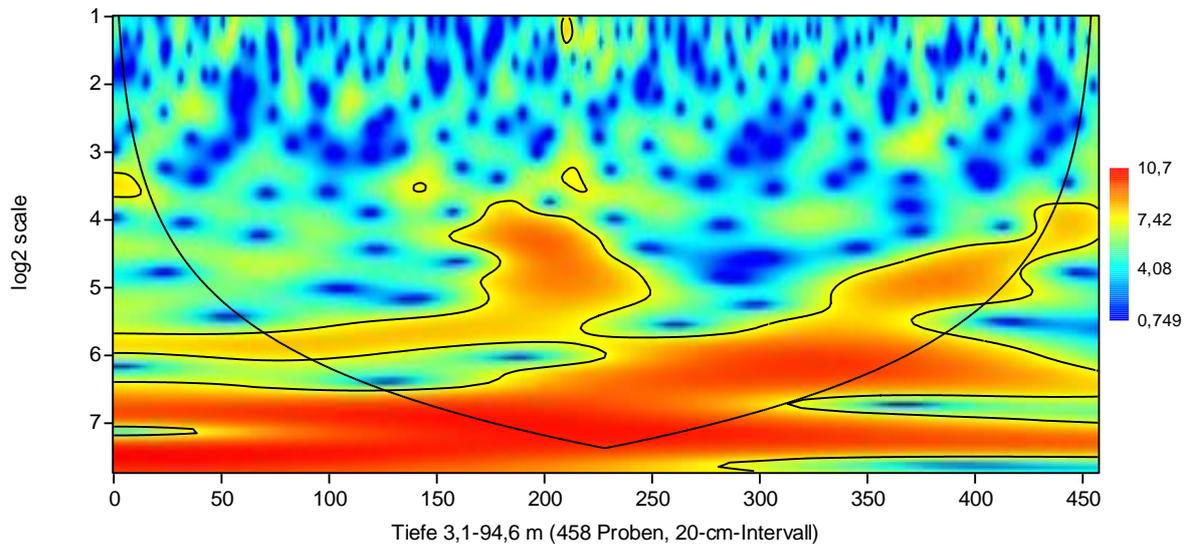
**Abb. 30** Relativer Anteil von *Plicatopollis* spp. im Messeler Ölschiefer, FB 2001.

Relativer %-Anteil von *Plicatopollis* spp. zur jeweiligen Gesamtmenge von Pollen und Sporen (= 100%). Linien-darstellung; 458 Proben im 20-cm-Abstand; Alters-zu-Tiefen-Transformation: 20 cm etwa 1.400 [Warven-] Jahre. Zeitkalibrierte Datenreihe aus LENZ et al. (2011), ihre SM Table (Cluster 8).

Zu Cluster 8 (relativer Anteil von *Plicatopollis* spp., prozentual häufigste Palynomorphe, Abb. 30): Die Peaks des Lomb-Periodogramms (Abb. 32a),  $0,0049/0,0092/0,0118/0,0203/0,0377$  Zyklen pro 1.000 [Warven-] Jahre, stimmen mit den Peaks der Redfit-Darstellung (Abb. 33a),  $0,0047/0,0109/(0,0203)/0,0374$  Zyklen pro 1.000 [Warven-] Jahre, bis auf eine Position im Wesentlichen überein. Letztere Reihe entspricht Perioden von  $212,8/91,7/(49,3)/26,7$  [Warven-] Jahren. Die von LENZ et al. (ihre Fig. 13c) ausgewiesenen Peaks von  $0,0094/0,0235/0,0376/0,0486$  Zyklen pro 1.000 [Warven-] Jahre entsprechen Perioden von

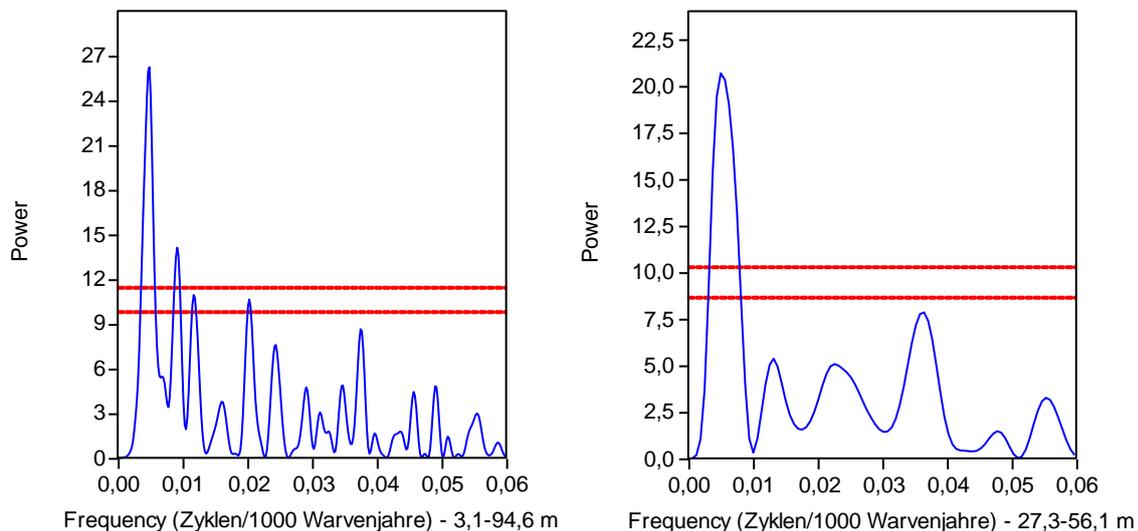
<sup>163</sup> LENZ et al. führten Redfit-Analysen (Rot-Spektrum) durch. Die jeweils gewählte Parameter-Einstellung einer Redfit-Analyse kann einen Einfluss auf die Energieverteilung und die Signifikanz von Peaks haben. Häufig weisen Redfit-Analysen höhere Signifikanz-Level als Lomb-Periodogramme (Weiß-Spektrum) aus, vgl. Abb. 31b und Abb. 32b). Dass es sich bei solcherart Reihen um Rotspektren handelt, ist bereits eine interpretierende Annahme.

~106/~41/~25/~20,5 [Warven-] Jahren, die sie den [theoretischen] Orbitalzyklen der Exzentrizität, Obliquität bzw. Präzession (lang und kurz) zuweisen. Die Perioden weichen teilweise deutlich voneinander ab.



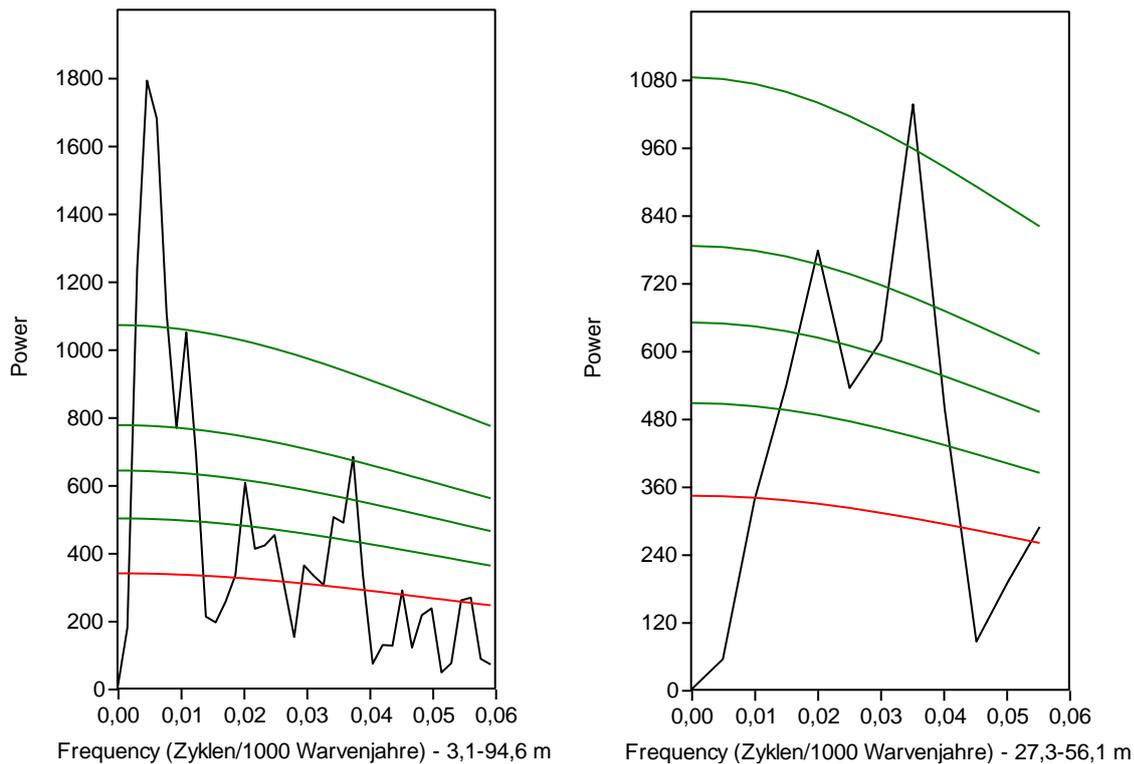
**Abb. 31** Wavelet-Darstellung des relativen Anteils von *Plicatopollis spp.*

Datenreihe wie Abb. 30. Das Wavelet (Morlet-Modus) zeigt keine deutlichen Periodizitäten (ausgeprägte linienhafte horizontale gelbe/rote Bänder, die von blauen/grünen Bereichen begrenzt werden), weder für das gesamte Profil noch für einzelne Abschnitte. Die horizontale Zone bei etwa 5,9 (log2-Skala) deutet eventuell auf eine Periodizität hin; diese entspräche einer Periode von 83,6 k[W]a ( $2^{5,9} = 59,7 \times 1,4$  k[W]a; vgl. Abb. 32). Diskussion siehe Textteil. Umrandungen: Signifikanz-Level 95% ( $\alpha = 0,05$ ); konische Linie („cone of influence“); Markierung der ggf. beeinflussten Randbereiche; führt zum „Ausschluss“ niedrigfrequenter Peaks (z. B. 1. Peak in Abb. 32). Farbskala: Intensität.



**Abb. 32** Lomb-Periodogramme des relativen Anteils von *Plicatopollis spp.*

a) Gesamtprofil; die Peaks 0,0049/0,0092/0,0118/0,0203/(0,0377) Zyklen pro 1.000 [Warven-] Jahre entsprechen Perioden von 204,1/108,7/84,7/49,3/(26,5) k[W]a bzw. 29,2/15,5/12,1/7,0/(3,8) m. b) Tiefenabschnitt 27,3 bis 56,1 m; die Peaks 0,0050/(0,0365) Zyklen pro 1.000 [Warven-] Jahre entsprechen Perioden von 200/(27,4) k[W]a bzw. 28,6/(3,9) m. Diese Peaks korrespondieren mit dem ersten und letzten Peak von ‚a‘. Die anderen Peaks sind deutlich unterhalb der Signifikanz-Level. Diskussion siehe Textteil. Zeitkalibrierte Datenreihe aus LENZ et al. (2011), ihre SM Table (Cluster 8). Rote Linien: Signifikanz-Level 95/99% ( $\alpha = 0,05/0,01$ ); () = Werte unterhalb der Signifikanz-Level.

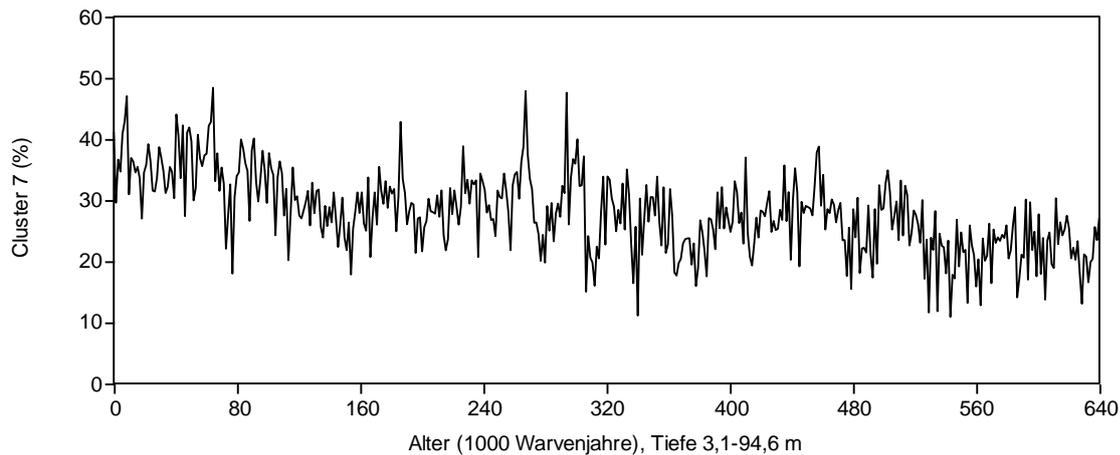


**Abb. 33** Redfit-Darstellungen des relativen Anteils von *Plicatopollis* spp.

a) Gesamtprofil; die Peaks 0,0047/0,0109/(0,0203)/0,0374 Zyklen pro 1.000 [Warven-] Jahre entsprechen Perioden von 212,8/91,7/(49,3)/26,7 k[W]a bzw. 30,4/13,1/(7,0)/3,8 m. () Werte unterhalb der Signifikanz-Level von 95/99 %. Vergleich zu LENZ et al. (2011, ihre Fig. 13c): ausgewiesene Peaks von 0,0094/0,0235/0,0376/0,0486 Zyklen pro 1.000 [Warven-] Jahre entsprechen Perioden von ~106/~41/~25/~20,5 k[W]a, die sie der theoretischen Exzentrizität, Obliquität bzw. Präzession zuweisen. b) Tiefenabschnitt 27,3 bis 56,1 m; die Peaks 0,0212/0,0352 Zyklen pro 1.000 [Warven-] Jahre entsprechen Perioden von 47,2/28,4 k[W]a bzw. 6,7/4,1 m. Vergleich zu LENZ et al. (2011, ihre Fig. 13d): ausgewiesene Peaks von 0,021/0,038 Zyklen pro 1.000 [Warven-] Jahre entsprechen Perioden von ~47/~28 k[W]a, die sie der theoretischen Obliquität bzw. Präzession zuweisen. Zeitkalibrierte Datenreihe aus LENZ et al. (2011), ihre SM Table (Cluster 8). Rote Linie: Level AR(1); grüne Linien (von unten nach oben): Signifikanz-Level 80/90/95/99 %. Redfit-Einstellungen: Oversample (2), Segments (3); Window (rectangle). – Diskussion siehe Textteil.

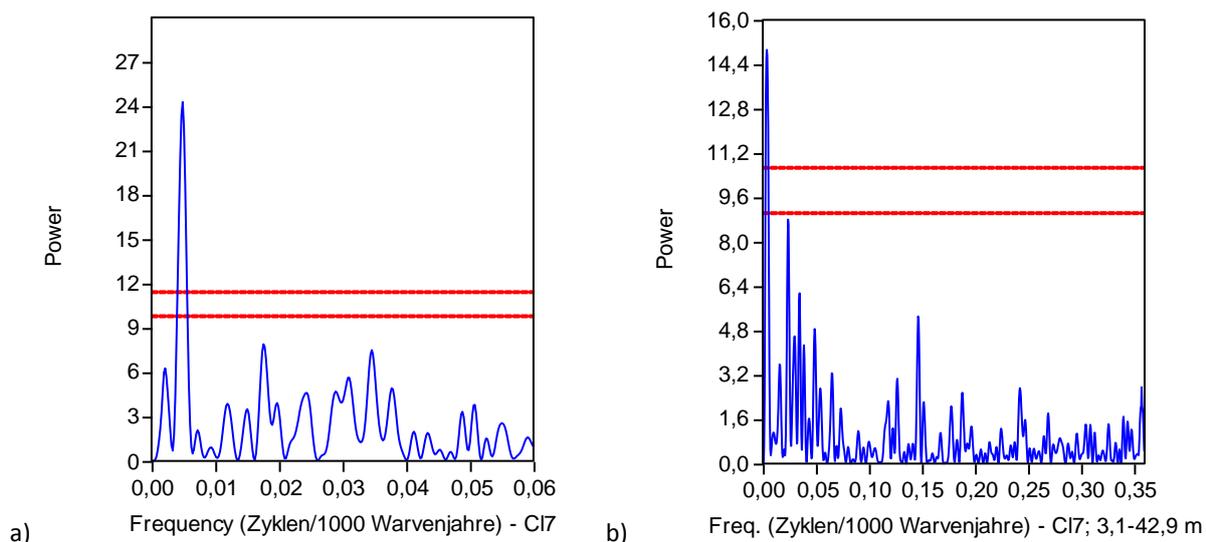
Hinsichtlich ihrer Redfit-Analysen akzeptieren LENZ et al. Peaks  $\geq$  der AR(1)-Linie, welche teilweise noch unterhalb des 80 %-Konfidenzniveaus liegen. Dadurch ergeben sich eine Vielzahl von „Zyklen“, pro Cluster i. d. R.  $>15$ , die für das Gesamtprofil über alle Cluster eine Periodendickenspanne von etwa 0,4 bis 19 m abdecken, mit Einzelwerten (aus Tab. 23; teilweise zusammengefasst) von<sup>164</sup>: 19,3/17,9/15,1/14,3/12,4/8,6 m (Zuweisung zu E); 8,3/7,0/6,7-6,6/6,2-5,6/5,3-4,9/4,6 m (Zuweisung zu O); 4,1-3,1/3-2,7/2,4 m (Zuweisung zu P); sowie fast übergangslos der Bereich von 2,4 bis 0,4 m. Demnach liegt eine quasi-durchgängige Periodenabdeckung vor. Damit kann fast jeder mögliche Wert den [theoretischen] Milankovitch-Zyklen zugeordnet werden.

<sup>164</sup> Bei der Rückrechnung von Periodendauer zu Periodendicke wird kalkulatorisch eine Sedimentationsrate von 0,143 mm/[W]a angesetzt; entspricht dem Verhältnis von 91,6 m zu 640.000 [Warven-] Jahren.



**Abb. 34** Relativer Anteil der Spezies des Cluster 7 im Messeler Ölschiefer.

Relativer %-Anteil von *Tricolpopollenites liblarensis/quisqualis* und *Tricolporopollenites cingulum* (Cluster 7), die prozentual häufigsten Palynomorphen nach *Plicatopollis* spp. (Cluster 8); in Relation zur Gesamtmenge von Pollen und Sporen (= 100%). Liniendarstellung; 458 Proben im 20-cm-Abstand; Alters-zu-Tiefen-Transformation: 20 cm etwa 1.400 [Warven-] Jahre. Zeitkalibrierte Datenreihe aus LENZ et al. (2011), ihre SM Table (Cluster 7).

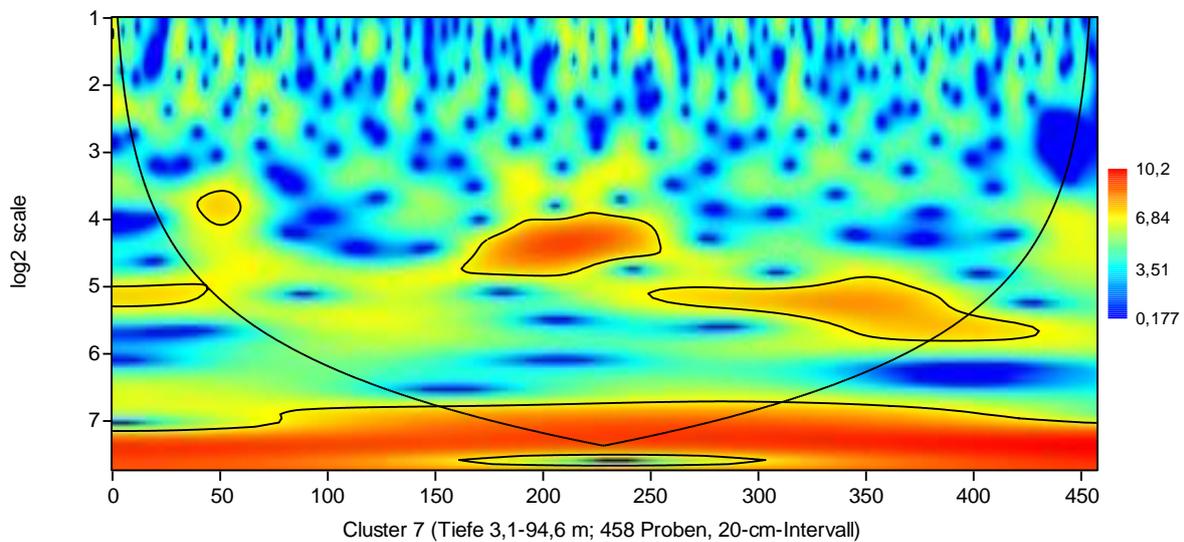


**Abb. 35** Lomb-Periodogramme des Cluster 7.

a) Gesamtprofil; die Peaks 0,0049/(0,0176)/(0,0346) Zyklen pro 1.000 [Warven-] Jahre entsprechen Perioden von 204,1/(56,8)/(28,9) k[W]a bzw. 29,2/(8,1)/(4,1) m; LENZ et al. (2011) weisen Peaks von 58/28/19 k[W]a aus (Tab. 23). b) Tiefenabschnitt 3,1 bis 42,9 m (0-300 k[W]a); die niedrigfrequenten Peaks 0,0038/0,0238/(0,0346) Zyklen pro 1.000 [Warven-] Jahre entsprechen Perioden von 263/42/(29) k[W]a bzw. 37,6/6,0/(4,1) m; LENZ et al. (2011) weisen Peaks von 37/20 k[W]a aus (Tab. 23). Darüber hinaus gibt es zahlreiche Ausschläge unterhalb der Signifikanz-Level. Diskussion siehe Textteil. Zeitkalibrierte Datenreihe aus LENZ et al. (2011), ihre SM Table (Cluster 7). Rote Linien: Signifikanz-Level 95/99% ( $\alpha = 0,05/0,01$ ); () = Werte unterhalb der Signifikanz-Level.

Die Philosophie von LENZ et al. wird diesem Umstand gerecht; so reicht für jedes Cluster eine Bandbreitenzuordnung zum „Nachweis“ von Milankovitch-Zyklen aus (Tab. 23, jeweils k[W]a), im Einzelnen: [theoretische] Exzentrizität mit 60(?)–87–135; [theoretische] Obliquität mit 34–49–58(?), [theoretische] Präzession mit 17–29; Sub-Milankovitch mit  $\leq 16$ . Das Ergeb-

nis in Summe (S. 1867): „Alle Cluster zeigen distinkte Signale innerhalb der Spanne des Milankovitch-Frequenzbandes.“



**Abb. 36** Wavelet-Darstellung des Cluster 7.

Datenreihe wie Abb. 34. Das Wavelet (Morlet-Modus) zeigt keine deutlichen Periodizitäten (ausgeprägte linienhafte horizontale gelbe/rote Bänder, die von blauen/grünen Bereichen begrenzt werden), weder für das gesamte Profil noch für einzelne Abschnitte. Die horizontalen Zone bei etwa 4,8 und 5,5 (log2-Skala) deuten eventuell auf Periodizitäten hin; diese entsprächen Perioden von 39 und 63 [W]a. Umrandungen: Signifikanz-Level 95% ( $\alpha = 0,05$ ); konische Linie („cone of influence“): Markierung der ggf. beeinflussten Randbereiche. Farbskala: Intensität.

Methodisch und systemisch sind subjektive Maßnahmen zur Verstärkung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses durchgeführt worden. Dazu zählen das Clustering in acht Gruppen (S. 1855), „(...) um die statistische Signifikanz der Zeitreihensignale zu verbessern und Elemente mit niedrigen Häufigkeiten innerhalb des Pollenspektrums zu berücksichtigen“ (auch die Zusammenstellung der Cluster selbst) sowie spektralanalytische Maßnahmen von der Datenaufbereitung (Parametrisierung) zur Datenpräsentation. Diese Maßnahmen lassen in Verbindung mit einer Überinterpretation der Varianzspektren eine konstruierte *zyklische* Variabilität vermuten.

So scheint die Vielzahl der von LENZ et al. spektralanalytisch ermittelten und als signifikant ausgewiesenen Zyklen insgesamt nicht ein Real-Abbild des Polleintrags zu reflektieren. Dass einzelne Palynomorphen bzw. Palynomorphen-Gruppen sich derart unterschiedlich (periodisch) verhalten haben, ist äußerst unwahrscheinlich. Das Gesamtbild scheint vielmehr für einen chaotischen Eintrag (Wind, Wasser und weitere Faktoren) der Palynomorphen in den Kratersee zu sprechen.

Abschließend ist das Warven-Sedimentationsmodell und die Annahme einer „kontinuierlichen Sedimentation mit einer konstanten Rate“ (siehe Fußnote 155) in Frage zu stellen. In ihrer detaillierten, makroskopischen Profilbeschreibung<sup>165</sup> für den 101 m langen Abschnitt

<sup>165</sup> FELDER & HARMS (2004) bezeichnen den Messeler Ölschiefer als Schwarzpelit und beschreiben ihn als einen dunklen, bituminösen, oft feinlamierten und stark wasserhaltigen Ton. Kurzbeschreibung: „0-94 m: Schwarzpelit, unterschiedlich fein laminiert, mit flaserigen, gradierten Groblaminen und Feinschichten,

der Mittleren Messel-Formation (FB Messel 2001) weisen FELDER & HARMS (2004) annähernd 2.000 Einzelpositionen aus (häufig im cm-Bereich). Bemerkenswert ist, dass über 1.000 Mal der Begriff „gradiert“ (deutliche zu- oder Abnahme der Korngröße) verwendet wird<sup>166</sup>, ein Hinweis auf bodennahen Transport durch Trübe- oder Trümmerströme (für das Beckeninnere ihre jeweiligen Endglieder). Diese Sedimentationsereignisse können dutzend- bis hundertfach pro Jahr stattgefunden haben. Darüber hinaus beobachtete WEBER (1988, zitiert in LIEBIG 2001), dass viele Laminae auf kurze Distanz auskeilen. Der Sedimentationscharakter ist also primär diskontinuierlich und episodisch (chaotisch) und nicht kontinuierlich und ratierlich. Unter dieser Voraussetzung ist von einem Kurzzeitsee auszugehen (vgl. THIELE-PFEIFFER 1988, Fußnote 161), dessen „Existenzdauer“ nicht genau bestimmt werden kann. Demzufolge basiert die von LENZ et al. vorgenommene Alters-zu-Tiefen-Transformation und damit ihre Zeitskala auf einer unzutreffenden Grundlage.

### **Systematik**

Zuweisung.

### **Fazit**

LENZ et al. (2011) weisen spektralanalytisch eine Vielzahl von Zyklen aus. Im Gesamtkontext scheint die (quantitative) *zyklische* Vegetationsvariabilität hauptsächlich einer methodischen Konstruktion sowie eine Überinterpretation der Varianzspektren geschuldet und nicht real. Ihr Altersmodell basiert auf einer verbreiteten, aber unfundierten Annahme einer Warvierung<sup>167</sup>; demzufolge haben die Zeitreihen und die Zeit-bezogenen Aussagen – die Milankovitch-Zyklen eingeschlossen – keinen substantziellen Wert<sup>168</sup>.

---

wechselnden Anteil von Sideritlaminae und rotbraunen Algenlaminae, fossilführend, Ösen- bis Entwässerungsstrukturen; unter ca. 40 m: nach unten zunehmend mit geringmächtigen, extraklastführenden Resedimenten.“ – Pelit: feinkörniges Sedimentgestein mit Bestandteilen, deren Korndurchmesser < 0,02 mm betragen (entspricht Ton bis Mittelschluff/-silt). Im Messelsee ist von einer raschen Sedimentation der Resedimente auszugehen (Resedimentationsereignis).

<sup>166</sup> Nach FELDER UND HARMS (2004, Anhang 2) ist eine Gradierung flaseriger Laminae und Schichten, wenn sie auftritt, stets auf die obersten 0,1 bis 1 cm beschränkt.

<sup>167</sup> Siehe auch LENZ et al. (2010): eine neuerliche Abzählung von Feinlaminae des Ölschiefers und eine Zuweisung einer Jahresschichtung. Eine Zuweisung aber ist kein Nachweis.

<sup>168</sup> In einem weiteren Schritt nutzen LENZ et al. (2014) ihre nunmehr auf die Exzentrizitätsbandbreite Bandpassgefilterten Cluster, um eine bestmögliche Korrelation (Zuweisung) zu den astronomischen Modellen La2010a und La2010d (LASKAR et al. 2011) herzustellen. Mit der zuvor erfolgten Korrektur der einzigen radiometrischen Datierung unter Zugrundelegung neuer FC-Standards (siehe auch Fußnote 143) um 0,3-0,5 Mio. [radiometrische] Jahre nach hinten (älter), nunmehr  $48,27 \pm 0,22$  bis  $48,11 \pm 0,22$  Mio. [radiometrische] Jahre und dem jeweils fixierten Ankerpunkt bei 48,05 Mio. [radiometrische] Jahre (La2010a) bzw. 48,25 Mio. [radiometrische] Jahre (La2010d) ergibt sich ein „Puffer“ von 200-300 Tausend „Warven“-Jahre für die La2010a-Variante und 100-150 Tausend „Warven“-Jahre für die La2010d-Variante“ für die Dauer der Unteren Messel Formation (LMF). – Diese (absolute) Fixierung – das Auflegen der theoretischen astronomischen Skala auf die radiometrische Skala – ist letztendlich nur eine Zuweisung im Rahmen des neuen radiometrischen Alters und eine anschließende Feinkalibrierung mit theoretischen astronomischen Zyklen, also die konsequente Anwendung von Zykostratigraphie und Astrochronologie.

## 5.14 Die Konstruktion des theoretischen astronomischen 405k-Jahr-Zyklus an oberpermischen Sedimentfolgen in Südchina

### **Titel**

Wu et al. (2013): Time-calibrated Milankovitch cycles for the Late Permian. [*Zeitkalibrierte Milankovitch-Zyklen für das Oberperm*].

### **Lithostratigraphie, Untersuchungsgebiet**

Changxing-Formation bei Meishan sowie Wujiaping-Formation und Dalong-Formation bei Shangsi; beide Orte in Südchina, etwa 1.350 km voneinander entfernt.

### **Stratigraphisches Alter**

Changhsingium- und Wuchiapingium-Stufe (Lopingium, Oberperm).

### **Beschreibung und Relevanz**

Das Ziel der Autoren ist – mangels eines astronomischen Modells über das Mesozoikum hinaus –, über eine radiometrische (absolute) Zeitkalibrierung erstmals in oberpermischen, zyklisch interpretierten Sedimentfolgen Milankovitch-Zyklizität aufzuzeigen und damit einen signifikanten Fortschritt in der Definition der paläozoischen Astronomischen Zeitskala (ATS) zu leisten.

Die Sedimentgesteine bei Meishan<sup>169</sup> und Shangsi repräsentieren oberpermische Beckenablagerungen des östlichen Paläotethys-Ozeans. Die gut geschichtete Abfolge bei Meishan (Changxing-Formation, etwa 41 Meter mächtig; Changhsingium-Stufe) besteht vorwiegend aus kalkigen Tonsteinen mit dünnen zwischengeschalteten Kieselschiefern; sie werden als Ablagerungen eines Milieus im Grenzbereich von Schelf (Karbonatplattform) und Abhang interpretiert. Dem gegenüber werden die Abfolgen bei Shangsi vom Liegenden zum Hangenden zunächst als ein Milieu einer sich vertiefenden Plattform (Wujiaping-Formation; karbonatreich, etwa 52 Meter mächtig), sodann als ein Milieu im Bereich Abhang/Becken (Dalong-Formation; Übergang von Kalksteinen zu Tonsteinen, etwa 42 Meter mächtig) gedeutet. In den Abfolgen befinden sich auch zahlreiche vulkanische Aschelagen. An den aus ihnen extrahierten Zirkon- und Monazit-Kristallen sind von SHEN et al. (2011) Isotopendatierungen vorgenommen worden, deren Alter Wu et al. nutzen, um die [vermeintlichen] Zyklen radiometrisch zu kalibrieren.

### **Methodik I: Untersuchungsgegenstand und Messreihen**

Generierung der Wertereihen (jeweils Variable zu Profilmeter):

- Magnetische Suszeptibilität (MS), Meishan: portabler MS-Meter, Probenabstand 2 cm,  $\Sigma$  1.970 Messungen.

---

<sup>169</sup> Im Aufschluss bei Meishan sind formal die Referenzpunkte (GSSP) für die Perm/Trias-Grenze (YIN et al. 2001) und die Basis der Changhsingium-Stufe (JIN et al. 2006) festgelegt worden.

- Anhysteretische remanente Magnetisierung (ARM), Shangsi: Probenabstand 5 cm (Wujiaping-Formation) bzw. 1-2 cm (Dalong-Formation),  $\Sigma$  2.700 Messungen.  
Datenaufbereitung: Lineare Interpolation zu gleichen Abständen (1 cm); Resampling [Generierung zusätzlicher, künstlicher Datenpaare], Prewhitening (Entfernung gewichteter Durchschnitte).

### **Methodik II: Alters-zu-Tiefen-Beziehung, Konstruktion der Zeitreihen, Tuning**

Generierung der (initialen) Zeitreihen (Alters-zu-Tiefen-Transformation): Übertragung der radiometrischen Alter (Rahmen); führt zu einer Gliederung des Shangsi-Profiles mit Variabilisierung der Sedimentationsrate.

Tuning: Die MS- und ARM-Zeitreihen des initialen U-Pb-Zeitrahmens („initial time framework“) sowie des sodann auf theoretische 405-ka-Zyklen getunten Zeitrahmens („tunes time framework“) sind linear interpoliert und Neuberechnet („resampled“) zu gleichen Zeiteinheiten (Shangsi: 1ka, Meishan 0,2 ka); (dabei entstehen erneut neue künstliche Datenpaare, die inzwischen zweifach interpretiert sind). Die finale Zeitskalen-Verankerung erfolgt am U-Pb-Alter von 252,28 Millionen [radiometrischen] Jahren.

Korrelation Sedimentzyklen mit astronomischen Zyklen: Zyklenlänge-Verhältnismethode (cycle length ratio method, nach WEEDON 2003).

### **Methodik III: Programme und Analysetechnik**

Analyse/Suche nach Sedimentzyklen: MTM (<http://www.atmos.ucla.edu/tcd/ssa/>), FFT (Spektrogramm), Wavelet (<http://www.paos.colorado.edu/research/wavelets>).

Datenaufbereitung: KaleidaGraph (nach CLEVELAND 1979), Analyseries 2.0.4.2 (PAILLARD et al. 1996).

Tuning-Prozess: Analyseries 2.0.4.2.

### **Zyklostratigraphische Interpretation**

Die MS- und ARM-Variationen werden als Abbild der lithologischen Wechsel betrachtet; höhere Werte korrespondieren mit Mergel, Tonsteinen und Schiefen, niedrigere Werte mit Kalksteinen. Sie zeigen insgesamt stabile Werte in einer Bandbreite von  $-1,4 \times 10^{-5}$  SI bis  $7,4 \times 10^{-5}$  SI (MS), im Durchschnitt  $1,98 \times 10^{-5}$  SI, und 0,025 bis  $5,67 \times 10^{-6}$   $\text{Am}^2\text{kg}^{-1}$  (ARM), im Durchschnitt  $0,78 \times 10^{-6}$   $\text{Am}^2\text{kg}^{-1}$ .

Die Fluktuationen werden insgesamt als Variationen des Verhältnisses terrestrischer Siliziklastika (Input detritisch magnetischen Materials) zu marinen Karbonaten interpretiert („most probably reflect“). Die Autoren schlagen vor (propose), dass astronomisch gesteuerte Klimawechsel die MS- und ARM-Variationen beeinflusst haben; Zeiten hoher Exzentrizität (Präzessions-induziert) hätten zu höheren Niederschlägen, höheren kontinentalen Abflussmengen und schließlich höherem sedimentären MS und ARM geführt.

## Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Autoren

Der Sedimentfolge des Meishan-Profiles (Changxing-Formation) werden ~4,5 konstruierte lange [theoretische] Exzentrizitätszyklen zugewiesen; der etwa 94 m langen Sedimentfolge des Shangsi-Profiles (Wujiaping-Formation und Dalong-Formation) ~19,25 Zyklen (Tab. 24).

Wu et al. präsentieren abschließend drei Ergebnisse:

- (1) Die Auffindung hochauflösender Milankovitch-Zyklen („discovered“).
- (2) Die Ermittlung der Dauer des Oberperms (Lopingium) mit 7,793 Millionen [astronomischen/radiometrischen] Jahren<sup>170</sup> im Einklang mit dem radiometrischen Altersrahmen.
- (3) Eine durch diese Studie ausgeweitete Astronomische Zeitskala (ATS) auf das Oberperm.

Profil	Profil-meter [m]	gefilterte Frequenz (Zyklen/m)	Periode	Zyklen rechnerisch	Zuweisung E-Zyklen	Sedimentationsrate [cm/k[r]a]	
						Ø	Variation
Meishan	0-41	0,11	9,10 m	4,5	E1 - E5 (1/2)	2,25	0,31-3,09
Shangsi	0-1	k.A.	k.A.	k.A.	E1	k.A.	0,24-4,34
	1-14	0,22 ± 0,08	4,55 m	2,9	E2 - E4	1,12	
	14-26	0,6 ± 0,3	1,67 m	7,2	E5 - E12	0,41	
	26-33	0,4 ± 0,12	2,5 m	2,8	E13 - E15	0,62	
	33-93,6	0,06 ± 0,02	16,7 m	3,6	E16 - E19	4,12	

**Tab. 24** Zyklostratigraphische Konstruktion (Meishan, Shangsi; China).

Aufstellung nach Wu et al. (2013), ihre Figs. 1-2 sowie ihre Supplementary Figs. S7-S8 und Tables S1-S2. Die Bildungsdauer der Sedimentfolgen wird durch radiometrische Altersdaten fixiert und durch konstruierte theoretische lange Exzentrizitätszyklen (E) weiter (fein-) segmentiert. Bereits die Anwendung der radiometrischen Altersdaten führt zu unterschiedlichen Sedimentationsraten; diese werden durch die getunten Zeitreihen weiter verändert (angepasst). – Diskussion siehe Textteil.

## Diskussion

Ein Vergleich der Varianzspektren der MS- bzw. ARM-Reihen (Zyklen pro Zentimeter) mit ihren „entsprechenden“ Zeitreihen (Zyklen pro tausend [radiometrische/astronomische] Jahre) zeigt, wie intensiv die Original-Daten von Wu et al. verändert worden sind, um sie einer (theoretischen) Milankovitch-Zyklizität anzupassen (ihre Figs. 3a und 3b, jeweils 1. Grafik mit 3./4. Grafik; ihre Figs. S8a mit S9b mit ihren Figs. S12a und S13a).

Selbst die Spektralanalyse der MS- bzw. ARM-Reihen setzt nicht auf die reine Rohdaten-Basis auf; sie wurde durch interpolierte Zusatzdaten inhaltlich und mengenmäßig, teilweise um den Faktor 5, ergänzt. Bei der Umwandlung in MS- bzw. ARM-Zeitreihen werden neue, veränderte Reihen produziert (Intervalle von 0,2 bzw. 1 k[r]a) sowie im weiteren Verlauf des Tuning-Prozesses. Dabei wird schließlich der 480-k[r]a-Peak<sup>171</sup> der radiometrisch zeitkalib-

<sup>170</sup> Die Zahl setzt sich für das Shangsi-Profil zusammen aus den Zyklen E<sub>1</sub> bis E<sub>19</sub> (7,695 Millionen [astronomische] Jahre) sowie einem Teil des Zyklus E<sub>0</sub> (rechnerisch 98 Tausend [astronomische] Jahre).

<sup>171</sup> Wu et al. (2013, 3): „The U–Pb age-constrained ARM spectrum has peaks at periods of 1,170, 480, 122, 100, 84, 50, 35.5, 29.4, 21.7 and 21 kyr (Fig. 3b, Supplementary Fig. S12).“

rierte ARM-Reihe durch Tuning auf den 405-k[a]a-Zyklus in einen 405-k[r]a-Jahr-Peak „überführt“.<sup>172</sup> Damit ist ein wesentliches Ziel der Autoren erreicht.

Nach eigenen Aussagen präsentieren Wu et al. Evidenz für Milankovitch-Zyklen.<sup>173</sup> An anderer Stelle schreiben sie, Milankovitch-Zyklen entdeckt bzw. identifiziert zu haben. Tatsächlich haben sie eine Erst-Zuweisung vorgenommen; sie interpretieren – ausgehend vom radiometrischen Zeitrahmen – einen der MS- bzw. ARM-Peaks als langen [theoretischen] Exzentrizitätszyklus. Und nach dem Tuning (s. o.) stellen sie sodann fest (S. 3): „Starke ~405k-Jahr-Zyklen dominieren in beiden U-Pb-zeitkalibrierten Serien, die wir als Evidenz einer Steuerung der Erde durch ihren orbitalen 405k-Jahr-Exzentrizitätszyklus interpretieren.“ – Ein Zirkelschluss! In der Folge leiten sie von diesem konstruierten langen (theoretischen) Exzentrizitätszyklus weitere Milankovitch-Zyklizitäten ab.

### **Systematik**

Tuning.

### **Fazit**

Wu et al. (2013) zeigen, wie Milankovitch-Zyklizitäten und Milankovitch-Zyklen konstruiert werden können. Die Möglichkeit der Konstruktion eines radiometrisch zeitkalibrierten Zeitintervalls von etwa ~405.000 [radiometrischen] Jahren und die Verwendung dieses Intervalls zu einer Segmentierung („Feinabstimmung“) der Geologischen Zeitskala (Oberperm) bedeutet nicht, dass Milankovitch-Zyklen nachgewiesen worden wären. Dies aber behaupten die Autoren.

## **5.15 Numerische Kalibrierung der Dauer der Toarcium-Stufe (Unterjura) mit dem theoretischen astronomischen 405k-Jahr-Zyklus an einer Sedimentfolge im Pariser Becken**

### **Titel**

BOULILA et al. (2014): Astronomical calibration of the Toarcian Stage: implications for sequence stratigraphy and duration of the early Toarcian OAE. [*Astronomische Kalibrierung der Toarcium-Stufe: Implikationen für die Sequenz-Stratigraphie und die Dauer des frühen Toarcium-OAE*<sup>174</sup>].

<sup>172</sup> Wu et al. (2013, 4): „(...) the 405-kyr-tuned ARM spectrum has peaks at 1,640-, 405-, 220-, 115-, 100-, 59-, 34-, 24-, 20.4-, 19.4- and 13.9-kyr periods (Fig. 3b, Supplementary Fig. S14).“

<sup>173</sup> „Here together with the new U–Pb dates (...), we study the stratigraphic cyclicity in the Shangsi and Meishan sections and present evidence for Milankovitch cycles in the late Permian (...)“ (Wu et al. 2013, 2).

<sup>174</sup> OAE: Oceanic Anoxic Event, ozeanisches anoxisches Ereignis. Es handelt sich um einen markanten negativen Kohlenstoff-Ausschlag (carbon-isotope excursion, CIE), ausgewiesen als  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  (‰, zum Standard V-PDB), in einer Bohrtiefe von etwa 344-350 m.

***Lithostratigraphie, Untersuchungsgebiet***

Keine Formationsangaben; Kernbohrung (1986-1987) bei Sancerre-Couy, etwa 250 km S Paris (Frankreich), südliches Pariser Becken.

***Stratigraphisches Alter***

Toarcium-Stufe (Unterjura).

***Beschreibung und Relevanz***

Ziel der Arbeit ist die erstmalige astronomische Kalibrierung der Dauer der Toarcium-Stufe sowie der Substufen und Ammoniten-Zonen.

Die 158 m mächtige marine Sedimentfolge der Toarcium-Stufe besteht hauptsächlich aus grauen Mergelsteinen mit unterschiedlichem Kalkgehalt und einer lokalen benthischen Makrofauna. Die Abgrenzung der Stufe erfolgt durch Ammoniten und Nanofossilien.

***Methodik I: Untersuchungsgegenstand und Messreihen***

Datengenerierung: Magnetische Suszeptibilität (MS); (direkte) Kernvermessung, Probenabstand 2 cm (360 bis 336 m Tiefe) bzw. 4 cm (336 bis 194,55 m Tiefe); in Summe 165,45 m und (rechnerisch) 4.736 Messungen. Das MS-Signal beruht auf paramagnetischem Verhalten, hauptsächlich von Ton.

Datenaufbereitung: Lineare Interpolation zu gleichen Abständen (2 cm); Entfernung eines Langzeittrends.

Datenverfügbarkeit (öffentlich): Boulila-etal\_2013 (2).tab; Datenverwendung durch den Verfasser (s. u.).

Datenreihe: MS-Werte zu Sedimenttiefe (siehe Abb. 37).

***Methodik II: Alters-zu-Tiefen-Beziehung, Konstruktion der Zeitreihen, Tuning***

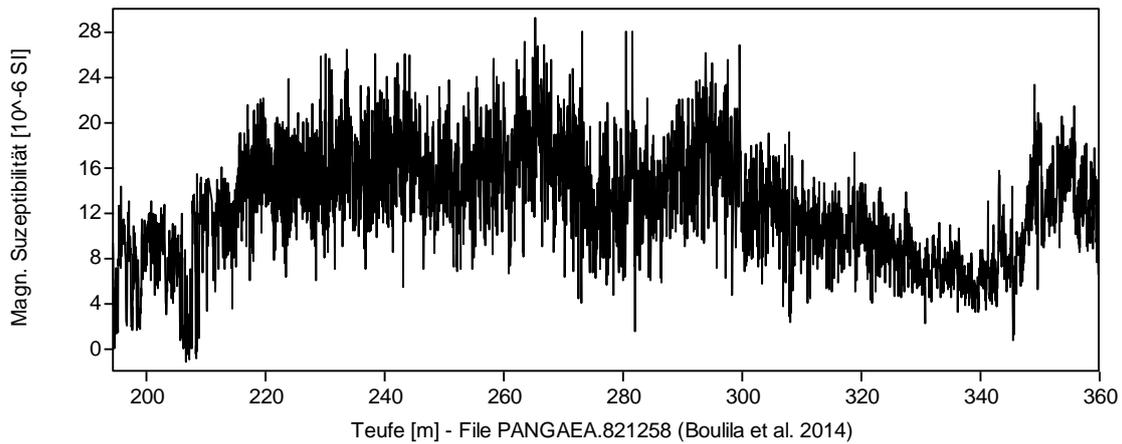
Generierung der Zeitreihe (Alters-zu-Tiefen-Transformation): Zeitkalibrierung der MS-Reihe mit dem [theoretischen] astronomischen 405-k[a]a-Zyklus, wie von LASKAR et al. (2004) empfohlen.

Feintuning: Amplitudenmodulations-Analyse (AM); getunte MS-Reihen zu [theoretischen] astronomischen Zeitreihen.

***Methodik III: Programme und Analysetechnik***

Analyse/Suche nach (Sediment-) Zyklen: MTM (THOMSON 1982) in Verbindung mit Red noise-Modellierung (MANN & LEES 1996), implementiert im SSA-MTM Toolkit (GHIL et al. 2002).

Zyklusextraktion: Tiefpass- und Bandpassfilterung (TANER 2000).



**Abb. 37** MS-Wertereihe, Kernbohrung Sancerre-Couy (Frankreich).

Liniendarstellung der Messwerte für den Tiefenbereich 194,55 bis 360 m; n = 4880. Datei: Boulila-etal\_2013 (2).tab.

### **Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Autoren**

BOULILA et al. zeigen für die spektralanalytisierte MS-„Roh“datenreihe starke Peaks bei ~8 und ~32 Meter (ihre Figs. 5B und S2)<sup>175</sup>. Auf Basis der Annahme einer Dauer der Toarcium-Stufe von 7,4 Millionen [radiometrischen] Jahren (HINNOV & PARK 1999) errechnen sie für einen 8-Meter-Zyklus ( $\Sigma$  ~157? m) eine durchschnittliche Periode von ~377 tausend [radiometrische] Jahre, einen Wert, der ihrer Einschätzung zufolge nahe des [theoretischen] 405-k[a]a-Exzentrizitätszyklus liegt. Mit der Isolierung (Extraktion) des 8-Meter-Zyklus weisen sie 21 T-Zyklen (T-1 bis T-21) aus.<sup>176</sup> Diesen T-Zyklen wird die 405-k[a]a-Periodizität zugewiesen. Weiteren höher- und niedrigfrequenten Peaks werden sodann (z. T. gruppenweise) weitere Milankovitch-Zyklen und -Subzyklen zugeordnet; der 32-Meter-Zyklus soll demgemäß eine längere Milankovitch-Periode von 1.600 k[a]a repräsentieren (Zyklen TOAR-1 bis TOAR-6).

Im Ergebnis beträgt die Dauer der Toarcium-Stufe – auf das [theoretische] 405-k[a]a-Metronom kalibriert – (mindestens) 8,3 Millionen [astronomische/radiometrische] Jahre<sup>177</sup>, eine Ausweitung gegenüber dem Ausgangswert von 7,4 Millionen [radiometrischen] Jahren um etwa 11 %.<sup>178</sup> Ihre Schlussaussage betont die [theoretische] orbitale Klimasteuerung (S. 109): „Wir folgern, dass die Sancerre-Mergel der Toarcium-Stufe unter astronomisch-steuernder Kontrolle kontinuierlich über mehrere Millionen Jahre abgelagert worden sind, resultierend in einer außergewöhnlichen Überlieferung einer direkten klimatischen und

<sup>175</sup> „The power spectrum of the raw MS series show two strong peaks of ~8 and ~32 m (...)“ (BOULILA et al. 2014, 101).

<sup>176</sup> Rechnerisch: 165,45 m/8 m = 20,7 Zyklen.

<sup>177</sup> Rechnerisch: 8,3 Millionen [radiometrische] Jahre/405.000 [radiometrische] Jahre = 20,5 Zyklen.

<sup>178</sup> OGG & HINNOV (2012) – L. A. HINNOV ist Co-Autorin der hier besprochenen Arbeit von BOULILA et al. (2014) – weisen eine Dauer der Toarcium-Stufe von 8,6 Millionen [radiometrische] Jahre aus (GTS2012); die Basis der Toarcium-Stufe ist formal noch nicht definiert. Das Ergebnis von BOULILA et al. (2014) – bezogen auf die Sedimentfolge des Pariser Beckens – kann (auch) als eine Annäherung an diesen Wert betrachtet werden.

eustatischen Response auf Präzession und Obliquität inklusive ihrer lang-periodischen Modulationen.“<sup>179</sup>

### **Diskussion**

Die Varianzspektren von BOULILA et al. zeigen eine hohe Anzahl von Peaks; der dadurch eröffnete Tuning-Spielraum ist außerordentlich groß. Für den gesamten Kernabschnitt können ihrer Abb. S2 folgend (SL  $\geq$  95 %) ungetunt  $\sim$ 56 Zyklen mit einer Perioden(dicken)spanne von 32 m (0,031 Zyklen/m) bis 0,12 m (8 Zyklen/m) entnommen werden; getunt sind es  $\sim$ 55 Zyklen mit einer Perioden(dauer)spanne von 1,65 Millionen [radiometrischen] Jahren (0,00061 Zyklen/1000 k[r]a) bis 6.500 [radiometrische] Jahre (0,15 Zyklen/1000 k[r]a). Vor der Spektralanalyse ist die Rohdatenbasis von BOULILA et al. um interpolierte Werte (einheitlicher 2-cm-Abstand) ergänzt worden. Diese Quasi-Verdopplung führt zu einer massiven Veränderung des Original-Datenbestandes.

Ein Spektren-Vergleich der MS-„Roh“-datenreihe, der sich auf eine unterschiedliche Analyse-Technik ( $2\pi$  MTM vs. Lomb-Periodogramm) und eine unterschiedliche Datenbasis (ergänzte Rohdaten, s. o., vs. Rohdaten) bezieht (Erstnennung jeweils BOULILA et al., Zweitnennung jeweils Verfasser), ergibt folgende Resultate: Die Lomb-Periodogramme zeigen ebenfalls eine hohe Anzahl von Peaks, häufig jedoch unterhalb des Signifikanz-Levels von 95 %; die Intensitäten der niedrigstfrequenten Peaks sind im Vergleich zu den restlichen Peaks sehr hoch (Abb. 38). Der Vergleich der Perioden für verschiedene Profilabschnitte zeigt deutliche Unterschiede und nur wenige wahrscheinliche Übereinstimmungen (Tab. 25). In Verbindung mit der Auswertung des (nahezu) gesamten Profils ist ein 32-Meter-Zyklus nicht zu erkennen. Vielmehr liegen Peaks bei einer Periode von  $\sim$ 20-23 m und  $\sim$ 7,0-7,6 m vor; Letzterer ist womöglich mit dem 8-Meter-Zyklus von BOULILA et al. (s. o.) identisch.

Die auffallend hohe Anzahl der Peaks könnte u. a. durch systemisch erzeugte, nicht-reale Nebenmaxima („Harmonische“) verursacht sein. Die Lomb-Periodogramme jedenfalls deuten darauf hin (vgl. Abb. 38b).

Das hier vorliegende Beispiel zeigt insgesamt: Ist einmal der Zugang geschaffen – hier die Zuweisung des „passenden“ [theoretischen] Orbitalzyklus auf den spektralanalytisch ermittelten 8-Meter-Zyklus –, ist das weitere Tuning scheinbar nur eine Frage der Technik. Und die Zuweisung der (T-) Zyklen zu eustatischen Sequenzen 4. Ordnung<sup>180</sup> ergibt sich aus der astronomischen/radiometrischen Dauer des Zyklus selbst.<sup>181</sup> Schließlich wird (als Klima-Design) eine orbital-induzierte Schwankung des Meeresspiegels vorgeschlagen.<sup>182</sup>

<sup>179</sup> BOULILA et al. (2014, 109): „We conclude that the Toarcian Sancerre marls were deposited continuously under astronomical forcing controls over many millions of years, resulting in an extraordinary record of direct climatic and eustatic responses to precession and obliquity, including their long-period modulations.“

<sup>180</sup> Siehe Fußnote 5. Zyklen 4. Ordnung haben eine definierte Dauer von 500.000 bis 100.000 [radiometrische] Jahre; sie „(...) sind die Folge von Milankovitch-Zyklizitäten (...)“ (SCHÄFER 2010, 329).

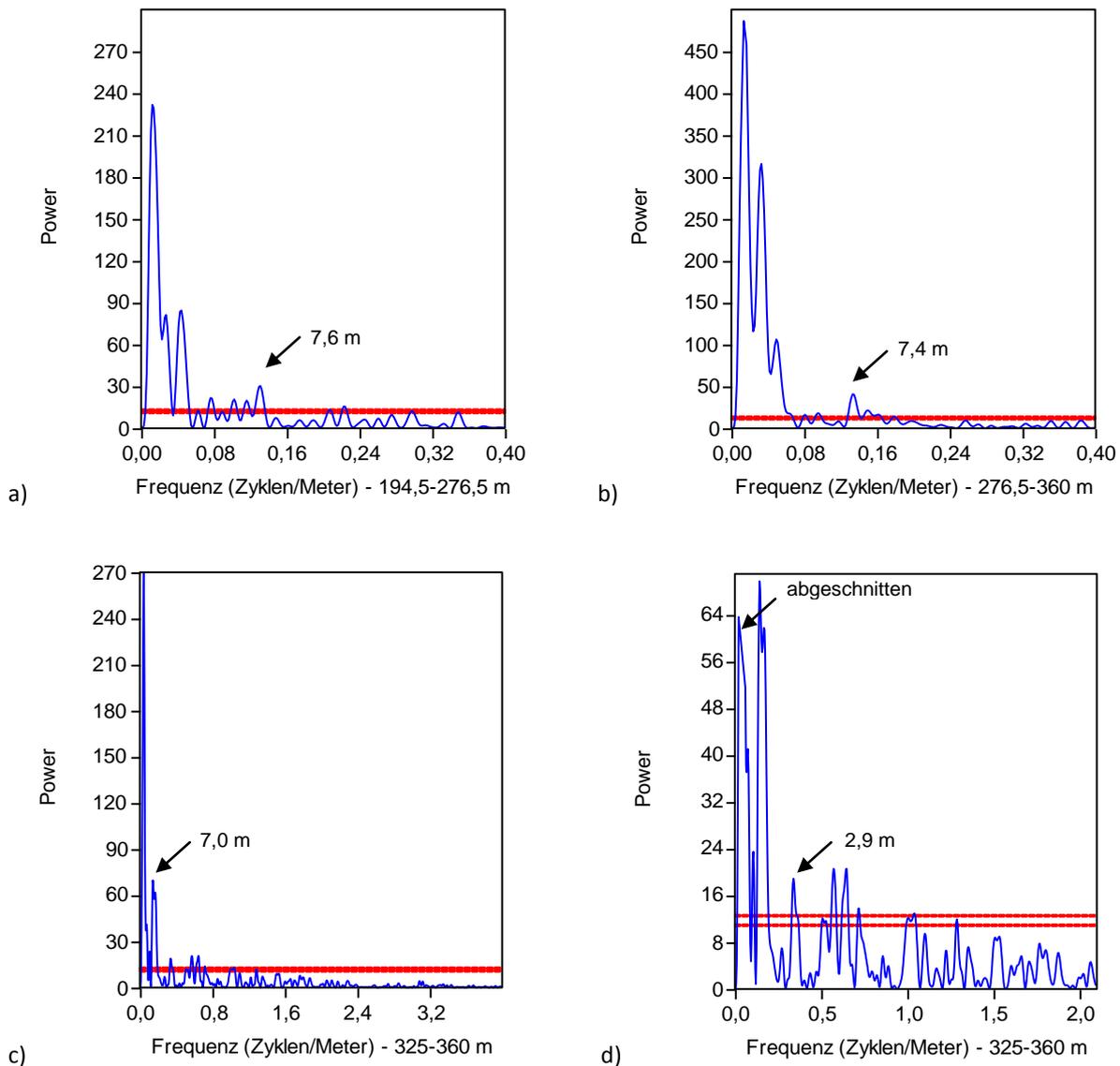
<sup>181</sup> „Thus, T-1 to T-21 MS cycles would correspond to fourth-order eustatic sequences“ (BOULILA et al. 2014, 108).

<sup>182</sup> BOULILA et al. (2014, 108): „We suggest that astro-climatic forcing exerts an hierarchical control on deep-sea marl sequences via sea-level change. This observation was extensively discussed in Boulila et al. (2011).“

Profil- abschnitt (Tiefe)	Verfasser			Boulila et al. 2014			Überein- stimmung (Periode)
	Power (Energie)	Frequenz (Zyklen/m)	Periode	Frequenz (Zyklen/m)	Periode (SL $\geq$ 95 %)	Zuweisung	
(a) 194,5 - 276, 5 m (82 m)	232	0,012	83,3 m		(keine)		
	81	0,027	37,0 m				
					30 m	E2	?
	84	0,044	22,7 m		(?)		
	13	0,063	15,9 m				
	22	0,076	13,2 m		13,6 m		?
	21	0,10	10,0 m		(?)		
	20	0,116	8,6 m				
	30	0,131	7,6 m		7,8 m	E1	X
	(weitere?, geringer Signifikanz-Level)			(bis 4,5)	(weitere 12)	e, o, p	
(b) 276,5 - 360 m (83,5 m)	504	0,015	66,7 m		(keine)		
	309	0,031	32,3 m				
	106	0,049	20,4 m		21 m	E2	X
	40	0,135	7,4 m		6,8 m	E1	X
	(weitere?, geringer Signifikanz-Level)			(bis 5)	(weitere 14)	e, o, p	
(c) 325 - 360 m (35 m)	269	0,043	23,3 m		(keine)		
	24	0,107	9,3 m				
	70	0,143	7,0 m		7,2 m	E1	X
	62	0,168	5,95 m		(?)		
	19	0,34	2,94 m				
	21	0,57	1,75 m		1,8 m		?
	21	0,65	1,54 m				
	14	0,72	1,39 m				
	12	1,01	0,99 m				
	13	1,04	0,96 m		0,97 m	o	?
	10	1,1	0,91 m				
	12	1,29	0,76 m		0,78 m	o	?
	9	1,51	0,66 m		0,67 m	o	?
	8	1,76	0,57 m				
	7	1,8	0,56 m		0,53 m	o	?
Signifikanz-Level: 0,01 (12,6); 0,05 (10,9)			(bis 8)	(weitere 8)	p		

**Tab. 25** Vergleich der Spektralanalysen der MS-Datenreihen (Sancerre-Couy).

Der Vergleich bezieht sich auf die angegebenen Kernabschnitte (BOULILA et al.): (a) ihre Fig. 5B, (b) ihre Fig. 5A, (c) ihre Fig. S3. Spektralanalyse (Technik):  $2\pi$  MTM (BOULILA et al.); PAST Lomb-Periodogramm (Verfasser). Die spektralanalytisch-ermittelten Zyklen weichen teilweise deutlich voneinander ab. Der kritische, von BOULILA et al. für die Kalibrierung ausgewählte 8-Meter-Zyklus, den sie dem (theoretischen) Milankovitch-Zyklus der langen Exzentrizität (E1) zuweisen, ist wahrscheinlich der Zyklus mit einer Periodenspanne von  $\sim 7,0/7,4/7,6$  m (Verfasser). Allerdings ist fraglich, ob es sich hier um reale Sedimentzyklen handelt. Diskussion siehe Textteil. – Legende: MS = magnetische Suszeptibilität; die (theoretischen) Milankovitch-Zyklen: E/e = Exzentrizitätszyklen, o = Obliquitätszyklen, p = Präzessions- und Sub-Präzessionszyklen.



**Abb. 38** Lomb-Periodogramme der MS-Rohdaten (Sancerre-Couy).

a) Bohrernabschnitt 194,5-276,5 m Tiefe; b) Bohrernabschnitt 276,5-360 m Tiefe; c) Bohrernabschnitt 325-360 m Tiefe; d) Ausschnitt („Vergrößerung“) von ,c‘; Periodogramme vom Verfasser. Zahlreiche Peaks haben eine Intensität unterhalb oder im Bereich der Signifikanz-Level; markant scheinen Peaks bei etwa ~7,0-7,6 m und ~20-23 m (siehe **Tab. 25**). Allerdings zeigen die Peaks Auffälligkeiten: Wahrscheinlich sind zahlreiche Harmonische (Nebenmaxima) ausgebildet, sodass alleine auf dieser Grundlage nicht mit Sicherheit zwischen realen und virtuellen Zyklen unterschieden werden kann. Beispiel ,b‘: die ersten drei energiereichen Peaks mit Perioden von 66,7/32,3/20,4 m (siehe **Tab. 25**) verhalten sich etwa wie 1 zu 1/2 zu 2/3.

### Systematik

Zuweisung, Tuning.

### Fazit

Die Arbeit von BOULILA et al. (2014) ist eine konsequente, zielgerichtete Zeitkalibrierung der Dauer der Toarcium-Stufe auf das [theoretische] astronomische 405k-Jahr-Metronom. Damit liefern die Autoren (informell) einen weiteren astrochronologisch-kalibrierten stratigraphi-

schen Abschnitt der Geologischen Zeitskala, der zur Befüllung (Belebung) der Astronomischen Zeitskala (ATS) beiträgt.

## **6 Über die Evidenz des Nachweises von Milankovitch-Zyklen – das Milankovitch-Zyklen-Syndrom**

### **6.1 Lineares orbital-geologisches System: System-Design und Test-Design**

HAYS et al (1976) postulieren ein einfaches „Radiation-Klima“-System, die unmittelbare Transformation „von orbitalen Inputs in klimatische Outputs“ (Abschnitt 5.3). *A priori* setzen sie die Langzeit-Variationen der Erdbahnparameter (Milankovitch-Zyklen) als gegeben voraus und schaffen mit ihrer Annahme eines zeitinvarianten, linearen Systems ein simples, kausal-operierendes orbital-geologisches Universum für die geologische Vergangenheit. Der Vorteil dieses System-Designs liegt darin, dass eine mögliche Überprüfung vorgezeichnet wird: die Suche nach – als Klimaindikatoren ausgewiesenen – Proxies, die ein entsprechendes (korrelierbares) Zeit-periodisches Verhalten aufweisen. Mit dieser zielorientierten Vorgehensweise wird die Grundlage zu einer eigen-konstruierten Beweisführung geschaffen, mit einem eigens dafür entwickelten Test (Test-Design). System-Design und Test-Design sind aufeinander abgestimmt; invers betrachtet führt das Test-Design (Was kann überhaupt demonstriert werden?) zum System-Design (Welche Konditionen müssen festgeschrieben werden, damit die Demonstration „schlüssig“ ist?).

Das orbital-geologische Universum der geologischen Vergangenheit ist eine Konstruktion, spekulativ und fiktiv; bislang konnte es nicht verifiziert werden. Wird von einem „klimatischen Output“ auf einen „orbitalen Input“ geschlossen als „Beweis“ für Langzeit-Variationen der Erdbahnparameter, mündet dies in einen Zirkelschluss.

Die von BERGER et al. (1992) vorgeschlagene Vorgehensweise (Abschnitt 4.1), die vier Teile der astronomischen Theorie (bzw. die vier Schritte zu ihr), wird diesem Sachverhalt nicht gerecht; wird ihr kritiklos gefolgt, kann dies zu irreleitenden Schlüssen führen.

#### ***Die Natur der stratigraphischen Überlieferung: nichtlineare Dynamik***

SMITH (1994) positioniert zu der [theoretischen] „Milankovitch-Maschine“ die hochkomplexe „Stratigraphie-Maschine“. Die „Milankovitch-Maschine“ sei eine einfache Kette aus drei Bindegliedern: a) Variationen der Insolation; diese bedingen b) Variationen des Klimas; diese wiederum bedingen die c) „Aufzeichnung“ der klimatischen Veränderungen (Wechsel) in der sedimentären Überlieferung. Auf der Grundlage dieser Annahme besteht ein einfacher Kausalzusammenhang, ein lineares System (s. o.).

Im Weiteren beschreibt er ein komplexes System von Interaktionen und Rückkopplungen, die „Stratigraphie-Maschine“, die ein [theoretisches] Orbital signal<sup>183</sup> passieren müsste, um eine Chance zu erhalten, in der Schichtenfolge verschlüsselt (encoded) zu werden<sup>184</sup>. Die einzelnen Komponenten der „Stratigraphie-Maschine“ sind (siehe Fig. 1, S. 534; ohne Darstellung von Beziehungen): Hebung, globale Tektonik, Klima, Erosion, Transport, regionale Tektonik, Meeresspiegel, Ablagerung, Subsidenz, Akkommodation<sup>185</sup>, Belastung (Auflast), Kompaktion, Erosion (nach Ablagerung), Diagenese.<sup>186</sup>

SMITH zeigt (qualitativ) auf, dass die „Stratigraphie-Maschine“ – sowohl hinsichtlich der „Verarbeitung“ als auch des Outputs – deutlich alle Charakteristika nichtlinearer Dynamik aufweist. Wird die stratigraphische Überlieferung als Produkt eines solchen nichtlinearen (chaotischen) Systems akzeptiert, so SMITH weiter, folgert daraus als unmittelbare Konsequenz: „(...) wir sind aufgefordert, einige unserer liebevoll gehüteten Voreingenommenheiten, insbesondere bezüglich Kausalität, zu überdenken.“

Dieser (neue) Gewinn an Erkenntnis (Stichwort Komplexität) zeigt insbesondere auf, dass die Natur der stratigraphischen Überlieferung nach über 200 Jahren intensiver Forschung noch nicht *wirklich* verstanden ist und dass um das Verständnis der Sedimentgesteine nach wie vor gerungen wird (z. B. MIALL & MIALL 2004, 28): „Die Gesteine ändern sich nicht, aber die ‚objektiven‘ Fakten, die Geologen von ihnen gewinnen.“ Ein „objektives“ Faktum ist zum Beispiel die Herleitung von Sedimentationsmodellen im radiometrischen Altersrahmen.<sup>187</sup>

---

<sup>183</sup> SMITH (1984, 542) geht a priori von einer Orbitalsteuerung während der (gesamten) geologischen Zeit aus: „Yes, the orbital forcing function is an influence on global climate throughout geological time, but getting it into the stratigraphic record is another matter.“

<sup>184</sup> Nichtlineare Systeme können auf ein eingehendes Signal resonieren (mitschwingen) oder es vollkommen löschen.

<sup>185</sup> Der verfügbare Raum für eine potentielle Sedimentakkumulation.

<sup>186</sup> Weitere Komponenten könnten hinzugefügt werden: Zur Erosion beispielsweise führen nur zwei Pfeile, Hebung und Klima, d. h. SMITH geht ausschließlich von einer atmosphärischen Verwitterung aus.

<sup>187</sup> Zur quartären und tertiären (neogenen) Sedimentation: SHACKLETON (2006) stellt die quartäre Tiefsee-Sedimentation der tertiären Meeresspiegel-nahen Sedimentation gegenüber. Die quartären Tiefsee-Sedimente zeichnen sich im Vergleich zu den (gleichaltrigen) nordwesteuropäischen terrestrischen Sedimenten grundsätzlich durch mehr Kontinuität aus, die Ausdruck in dem Konzept der „kontinuierlichen Partikel-für-Partikel-Sedimentation“ findet. Gelegentlich vorkommende Bioturbation würde Material nicht beseitigen, aber die Überlieferung zumindest verschleiern und (heutige) Strömungen hätten nur einen vernachlässigenden Effekt auf die Sediment-Umverteilung. Dagegen sei der Großteil der tertiären (stratigraphischen) Stufen in Meeresspiegel-nahen Sedimenten definiert worden; hier seien Abschnitte der Überlieferung unwiederbringlich durch Erosion und Resedimentation in tiefere Regionen verloren. Sedimente in diesem Milieu akkumulieren nicht „Tag-für-Tag“ oder „Jahr-für-Jahr“. Wie das geschieht beschreibt er allerdings nicht. Als Beispiel für eine „kontinuierliche Partikel-für-Partikel-Sedimentation“ nennt SHACKLETON (2006) den Tiefseekern OPD 677 (Panamabecken), bei welchem keine Sedimentationsunterbrechung (Hiatus) festgestellt wurde und die Sedimentationsakkumulationsrate sowohl für das gesamte Quartär als auch für das kleinste zu bestimmende (aufzulösende) Intervall gleich erscheint („appears to have been the same“): SHACKLETON, BERGER & PELTIER (1990) „demonstrierten eine einheitliche Akkumulationsrate von etwa 4 cm/k[r]a“, in einer Auflösung bis zur Präzessions-Skala (21 k[a/r]a). Augenscheinlich wurde und wird das quartäre Sedimentationsmodell einer extrem langsamen Sedimentation für die Tiefsee, das Konzept der „kontinuierlichen Partikel-für-Partikel-Sedimentation“, vom radiometrisch begründeten und mit [theoretischen] astronomischen Zyklen feinkalibrierten Altersmodell abgeleitet.

## 6.2 Vermeintlicher Milankovitch-Zyklen-Test: Von Periodenübereinstimmungen und Zeitreihenanalysen

### 6.2.1 Vom Zyklus zur Periode zum Vergleich

Das gebräuchlichste Argument zur Unterstützung einer [theoretischen] orbitalen (Milankovitch-) Steuerung des Klimas ist, dass die kalkulierte (Durchschnitts-) „Periode“ einer Abfolge sedimentärer Zyklen ungefähr mit (mindestens) einer der theoretischen Orbital-Perioden übereinstimmt<sup>188,189</sup>. Das Argument leitet sich hauptsächlich aus der Arbeit von HAYS et al. (1976) ab (Abschnitte 5.3 und 6.1) und wird in unterschiedlicher Ausprägung (z. B. BERGER et al. 1992, Abschnitt 4.1, Punkt 4; STRASSER et al. 2006, Abschnitt 4.1) als Teil der zyклоstratigraphischen Methodologie oder an sich als Nachweis für Milankovitch-Zyklizität verstanden; so bspw. bei SCHWARZACHER (1991, 859-860) in seinem Kapitel *Die Evidenz für Milankovitch-Zyklizität*: „Die meisten sedimentären Zyklen, von denen geglaubt wird, dass sie ultimativ auf orbitale Variationen zurückzuführen sind, bestehen aus einzelnen Schichten oder kleinen Gruppen von Schichten. Zu beweisen, dass solche Zyklen tatsächlich Milankovitch-Zyklen sind, ist oftmals unmöglich. Aber wenn man demonstrieren kann, dass die Zyklizität vorhanden und durchgehend ist, und wenn die Zeit, die durch die Zyklen repräsentiert wird, ungefähr im Milankovitch-Spektrum liegt, sollte die Wahrscheinlichkeit der astronomischen Kontrolle akzeptiert werden“.<sup>190,191</sup>

#### ***Demonstration der Periodenübereinstimmung***

Die „Demonstration“ einer Periodenübereinstimmung ist bei allen hier vorgestellten, jüngeren Arbeiten durchweg der Fall, jedoch in unterschiedlicher Ausprägung.

- Den Kleinzyklen des Buntsandstein wird direkt, geradezu minimalistisch, ein bestimmter [theoretischer] Orbitalzyklus zugewiesen (MENNING et al. 2005, 197; Abschnitt 5.9): „Eine Dauer von ca. 400 ka (lange Exzentrizität) oder ca. 40 ka (Schiefe der Ekliptik, obliquity) ist diesen Kleinzyklen bei Berücksichtigung der aktuellen Isotopenalter nicht zuzuordnen. Wenn Milankovitch-Zyklizität angenommen wird, so kann es sich nur um den 100-ka-Zyklus handeln. Davon ausgehend beinhaltet die Indusium-Stufe eine Dauer von ca. 1,5 Ma, nämlich das Zeitäquivalent von ca. 15 Kleinzyklen des Unteren Buntsandstein.“

<sup>188</sup> Nach ALEGO & WILKINSON (1988, 313); das gilt nach wie vor.

<sup>189</sup> Unter der Voraussetzung einer Gleichsetzung astronomischer und radiometrischer Jahre.

<sup>190</sup> Im Original: „Most sedimentary cycles which are believed to be ultimately due to orbital variation, consist of single beds or small group of beds. To prove that such cycles are, in fact, Milankovitch cycles is often impossible, but if one can demonstrate that the cyclicity is present and persistent and if the time presented by the cycles is approximately within the Milankovitch spectrum, the likelihood of astronomical control should be accepted.“

<sup>191</sup> In der Folge – wenn Daten über die lithologische oder Faunen-Zusammensetzung verfügbar sind –, kann die Spektralanalyse angewendet werden, um Zyklizität einwandfrei festzustellen („establish“). Aber auch hier: „In den meisten Situationen ist es nur möglich zu demonstrieren, dass ein sedimentärer Zyklus im Milankovitch-Spektrum liegt.“

- Eine durch subjektive Periodeneinpassung (Variabilität in der Anzahl der ausgewiesenen Zyklen und/oder Variabilität in der „Dauer“ der sedimentären Zyklen) erzielte Periodenübereinstimmung erfolgt z. B. bei LOURENS et al. (1996, Abschnitt 5.5) und WESTERHOLD et al. (2008, Abschnitt 5.11), aber auch bei MENNING et al. (2005).
- Durch Anwendung der Zeitreihenanalyse und ihrer spektralen Darstellung weisen z. B. HAYS et al. (1976), EL BAY et al. (2001, Abschnitt 5.8), KARAKITSIOS & AGIADI-KATSIAOUNI (2007, Abschnitt 5.10), TOUGIANNIDIS (2009, Abschnitt 5.12), LENZ et al. (2011, Abschnitt 5.13) über ungetunte (linear-zeitkalibrierte) und BOULILA et al. (2014, Abschnitt 5.15) über getunte Reihen entsprechende Periodenübereinstimmungen aus.
- Eine mittel- und unmittelbar durch Tuning erreichte Periodenübereinstimmung wird in der Arbeit von PETIT et al. (1999, Abschnitt 5.6) dargelegt.
- Eine zielgerichtete Konstruktion einer Periodenübereinstimmung liegt u. a. bei HERING (1995, Abschnitt 5.4), NEBE (1999, Abschnitt 5.7) und WU et al. (2013, Abschnitt 5.14) vor. Die Behauptung der Autoren, damit einen Nachweis von Milankovitch-Zyklen erbracht zu haben, beruht auf einem Zirkelschluss.

### **Zwangsläufige (zufällige) Übereinstimmung mit Milankovitch-Periodizitäten**

ALEGO & WILKINSON<sup>192</sup> zeigten aufgrund ihrer umfangreichen Stichprobe bereits 1988 auf, dass phanerozoische Zyklenperioden in Bezug auf die vier bedeutenden [theoretischen] Milankovitch-Zyklen (21, 41, 100 und 413 k[a]a) zufällig verteilt sind und Argumente für eine Milankovitch-Kontrolle ausschließlich basierend auf einer Durchschnittsperiode unbegründet („unfounded“) sind. SMITH (1994, 532) fasst die wesentlichen Punkte ihrer Arbeit wie folgt zusammen (teilweise vom Verfasser leicht modifiziert oder gekürzt):

- Eine Milankovitch-Band-Periodizität braucht nicht mit einer Orbitalsteuerung gleichgesetzt werden; alternative Mechanismen wie Autozyklizität sind verfügbar.
- Kalkulierte Perioden „mittelskaliger“ (1-100 m) sedimentärer Zyklen fallen geradezu zwangsläufig in das Milankovitch-Frequenzband, was auch immer ihre Ursache ist.<sup>193</sup>

<sup>192</sup> Trotz ihrer umfangreichen Kritik sind ALEGO & WILKINSON (1988, 313) von der Präsenz orbitaler Periodizitäten in marinen pleistozänen Sequenzen überzeugt: „(...) research beginning in the 1950's clearly established the presence of orbital periodicities in marine Pleistocene sequences (e.g., IMBRIE & IMBRIE 1979).“ Sie begründen dies (später, S. 320) mit der „voluminösen Datenlage“ und dem „klar definierten Mechanismus“ während einer glazialen Epoche, der sich in einer Korrelation der sedimentären Sequenzen/Zyklen mit den (jeweiligen) Veränderungen des Eisvolumens ausdrückt. – Zur weiteren Diskussion siehe dieses Kapitel 6 sowie die Abschnitte 4.5, 5.3 und 5.6.

<sup>193</sup> „Despite an often-claimed correspondence between cycle and Milankovitch orbital periods, factors independent of orbital modulation that affect cycle thickness and sedimentation rate may be responsible for such coincidence. For example, nearly all common processes of sediment transport and dispersal give rise to ordered depositional lithofacies sequences that span a relatively narrow range of thicknesses (...) Further, long-term sediment accumulation rates are generally limited by long-term subsidence rates, which converge to a narrow range of values for very different sedimentary and tectonic environments (SADLER 1981). In essence, the spectra of real-world cycle thicknesses and subsidence rates are relatively limited, and this in turn constrains the range of commonly-determined cycle periods. For many cyclic sequences, calculation of a Milankovitch-range period may be a virtual certainty, regardless of the actual generic mechanism of cycle formation“ ALEGO & WILKINSON (1988, 314).

- Verhältnisse von Periodizitäten zueinander (unabhängig, ob Dicke oder Zeit gewählt wird) sind von keinem Wert für einen Nachweis einer orbitalen Kontrolle, da zu viele Verhältnisse zwischen Paaren von Periodizitäten vorliegen, die von der astronomischen Theorie vorhergesagt werden.
- Schätzungen von Zyklenperioden sind in der Regel zu unpräzise, um eine Korrespondenz zu den vorhergesagten [theoretischen] Orbitalperioden mit irgendeinem Vertrauen zu demonstrieren.
- Die extreme Schwierigkeit, Gesteinsdicken zu (verflossener) Zeit in Beziehung zu setzen (bzw. zu transformieren), ist ein bedeutendes Hindernis, Rhythmicität in Zeit zu demonstrieren.
- Eine Regularität in der Zyklendicke steht in Abhängigkeit zu den Subsidenzraten.

Aus der Sicht von SMITH (1994) haben ALEGO & WILKINSON (1988) mit ihrer Arbeit eine exzellente Zusammenstellung der Argumente gegen eine Orbitalsteuerung geliefert.

**Fazit:** Das (vermutete) Vorhandensein einer Periodizität (Zyklizität, Rhythmicität) und eine Schätzung der Periodendauer (radiometrisch kalibriert), die dem Milankovitch-Frequenzband „entspricht“, ist kein Nachweis für einen orbital- (Milankovitch-) gesteuerten Zyklen-generierenden Mechanismus.

## 6.2.2 Über die Zeitreihenanalyse zum Zyklus?

Die Spektralanalyse wird als objektive, statistische Methode betrachtet, um Zyklen in (stratigraphischen) Werte- bzw. Zeitreihen aufzuspüren.<sup>194</sup> Mit diesem Vermögen ist sie scheinbar der subjektiven, makroskopischen Ansprache einer Sedimentfolge überlegen, die rhythmische bzw. zyklische Sequenzen „ungenau“ beschreibt oder keine Periodizitäten erkennen lässt, und ist darüber hinaus in der Lage, auch komplexe Verhältnisse, z. B. Überlagerungen (Superpositionen), aufzudecken und zu separieren. Das sind die „objektiven“ Gründe, warum ihr methodisch ein sehr hoher Stellenwert eingeräumt wird (vgl. Abschnitt 4.1).

Aber können mit der spektralen Analyse (Abschnitt 4.3) zyklische Variationen in der sedimentären Überlieferung *wirklich* nachgewiesen werden? Ist die Eingangsaussage nicht irreführend? Geht sie nicht bereits davon aus, dass *wahre sedimentäre Zyklen*, also durch ein oszillierendes System gesteuerte Zyklen, vorliegen (müssen)?

Eine ultimative Aufgabe der Zyklostratigraphie ist die „Identifikation zyklischer Variationen in der stratigraphischen Überlieferung“ (Abschnitt 2.2) insbesondere durch „Zeitreihenanalysen“ (Kap 4.1). Diese Zielorientierung birgt die Gefahr, erwartete Signale auch zu produzieren.

---

<sup>194</sup> „Spectral analysis is an objective, statistical method for detecting regular cyclicity in data called time series (...)“ (WEEDON 1991, 840). Als „regulären Zyklus“ bezeichnet WEEDON (S. 842) einen sedimentären Zyklus, der durch Anwendung der Spektralanalyse entdeckt (detected) wurde.

### **Anwendung der spektralen Analyse – eine Black Box?**

Die in den zyклоstratigraphischen Arbeiten (Kap. 5) mitgeteilten Informationen zur Art und Weise der Anwendung der spektralen Analyse sind teilweise sehr spärlich; dieser Teil der Arbeiten mutet wie eine Black Box an.

Eine Erzeugung systemischer, künstlicher Spektralpeaks ist bei den Datenkollektiven anzunehmen, die eine intensive Datenvor- und -aufbereitung erfordern oder wo dies als wünschenswert erachtet wird, insbesondere bei massenhaft generierten Daten (Grau- bzw. Farbwertmessungen, GR, MS, XRF), so bspw. bei NEBE (1999), EL BAY et al. (2001), BOULILA et al. (2014). Dies ist u. a. dann auffällig, wenn die Ergebnisse nicht im Einklang mit einer wahrscheinlichen Real-Sedimentation stehen.

Von einer „Vorglättung“ (prewhitening) oder Glättung der Reihen berichten KARAKITSIOS & AGIADI-KATSIAOUNI (2007, Abschnitt 5.10) und TOUGIANNIDIS (2009, Abschnitt 5.12). Die Erzeugung von Harmonischen ist bspw. bei BOULILA et al. (2014, Abschnitt 5.15) anzunehmen. HAYS et al. (1976, 5.3) teilten mit, dass sie ihre Zeitreihen im Vorfeld um Harmonische und Frequenzmissdeutung bereinigt hatten; das sind subjektive Maßnahmen. Auch Tuning-Artefakte (Wostok- $\delta D$ -Zeitreihe, Abb. 22b) scheinen von einer intensiven Homogenisierung der Daten zu zeugen.

In der Regel ist nicht nachvollziehbar, ob und ggf. welche konkreten Maßnahmen ergriffen und in welchem Umfang angewendet wurden, um das Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu erhöhen; nur wenige Autoren wie LENZ et al. (2011) äußern sich hierzu. Obwohl die Stichproben zeitkalibriert „zeitlich“ weit auseinanderliegen, wird meistens ein rotes Spektrum angenommen. Über die Wahl des Modells, den jeweiligen umfangreichen Parameter-Einstellungen, den Autokorrelationsberechnungen etc. können Varianzspektren signifikant voneinander abweichen.

Hinsichtlich der Sicherheit der Schätzaussage eines Signals (Peak) wird von manchen Autoren ein Level oberhalb der AR(1)-Linie als ausreichend erachtet, diese liegt häufig noch unterhalb des Signifikanz-Levels von 80 % (z. B. LENZ et al. 2011). WU et al. (2013) scheinen die (Akzeptanz-) Grenze bei 90 %, BOULILA et al. (2014) bei 95 % zu ziehen. TOUGIANNIDIS (2009) weist zahlreiche Varianzspektren aus, wo quasi alle Peaks die 99 %-Marke überschreiten. Aussagen zur Signifikanz fehlen bei HAYS et al. (1976), LOURENS et al. (1996), PETIT et al. (1999), NEBE (1999), EL BAY et al. (2001) sowie KARAKITSIOS & AGIADI-KATSIAOUNI (2007).

Kommen diese Punkte einzeln oder in Kombination zum Tragen, werden mehr Signale (Peaks) als „real“ erzeugt und als Zyklen interpretiert als möglicherweise „real“ vorliegen. Umgekehrt werden möglicherweise „reale“ Peaks eliminiert. Welche Peaks sind nun „real“, welche nicht, welche fehlen? Eine objektive „Realität“ scheint nicht gegeben.

Insgesamt ist festzustellen, dass durch die Datenvor- und -aufbereitung, durch subjektive Bereinigung, die Wahl des Schätzmodells und der spektralen Darstellung, die damit verbundene Wahl der Parameter, die visuelle Betonung (logarithmische Darstellung der Varianz), Wahl der Signifikanz-Level etc. beeinflussende Maßnahmen ergriffen und ggf. begünstigende<sup>195</sup> Umstände für den Ausweis von mehr und ggf. signifikanzverstärkten Signalen (Zyklen)

---

<sup>195</sup> Und damit ggf. irreleitende Umstände.

geschaffen werden können. Dies erschwert die Nachvollziehbarkeit und die Interpretation (Abschnitt 4.3) außerordentlich. Auch zeigen VAUGHAN et al. (2014), dass Datenvorbereitende Maßnahmen (Glättung, Filterung) für die Spektralanalyse künstliche Spektralpeaks erzeugen können.

### ***Die spektrale Analyse kann Zyklen nicht abschließend beweisen***

Durch die Modell-Transformation in eine Sinusfunktion (z. B. FFT) erfolgt eine „Mittelung“ und „Abstrahierung“; die spektrale Darstellung bezieht sich nicht auf die konkreten Reihen selbst, sondern auf die errechnete Sinusfunktion („Welle“). Die sinusoidalen Passungen (sinusoidal fit) für die  $\delta^{18}\text{O}$ -Reihe des Kerns RC11-120 zeigen Abb. 35 (nur Periode 360 cm) und Abb. 40 (Perioden 360/227/129/82 cm). Die errechneten Passungen sind Annäherungen, Schätzungen. Auch wenn in Abb. 40 eine gute Passung vorzuliegen scheint, sind im Detail die Ausprägungen anders und die Minima und Maxima teilweise gegenläufig; es wird nicht die Detailtiefe der konkreten Reihen erreicht. Darüber hinaus werden wichtige Ausprägungen wie abrupte Wechsel, Asymmetrien, rhythmische Charakteristika etc. „eliminiert“. Mittelung und Abstrahierung können eine begünstigende Aufwertung zu (reiner und harmonischer) Zyklizität bewirken. Die  $\delta^{18}\text{O}$ -Reihe des Kerns RC11-120 aber zeigt primär Charakteristika einer asymmetrischen Rhythmik und nicht einer Zyklik.

Es liegt schlussendlich in der Verantwortung des Bearbeiters, wie er diese Schätzungen interpretiert.

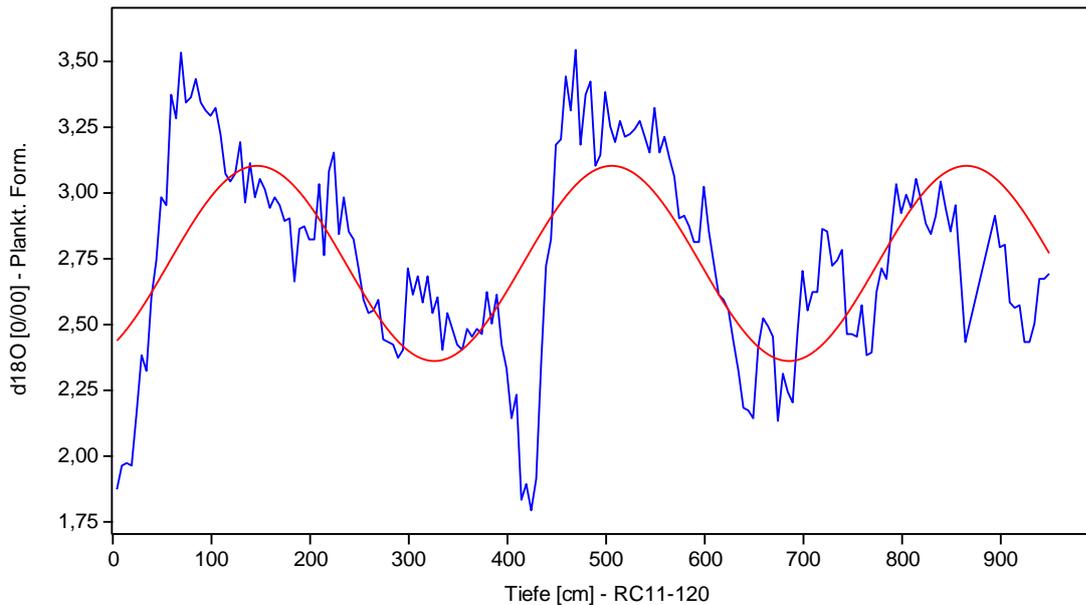
### ***Die spektrale Analyse kann wahre Zyklen nicht identifizieren***

Die spektrale Analyse kann *wahre Zyklen*<sup>196</sup> (einer nicht replizierbaren Vorzeit) nicht identifizieren. Die Frequenzen der Wertereihen („Zyklen“/m), insbesondere aber der Zeitreihen („Zyklen“/Zeiteinheit), sind abhängig von der Reihe (Input) selbst; diese wiederum gründet auf Vorstellungen (Modellen) zum Alter- und/oder der Sedimentation.

Die spektrale Analyse kann dazu verwendet werden, zu prüfen, ob eine Reihe das spektrale Ergebnis liefert, welches sich der jeweilige Bearbeiter ggf. vorstellt. Die Reihe kann belassen oder z. B. durch Tuning soweit verändert bzw. angepasst werden, bis ein sodann gewünschtes spektrales Ergebnis erreicht ist. Insofern ist die spektrale Darstellung „nur“ die Visualisierung der belassenen oder modifizierten Reihe, sie wird aber als „visuelle Evidenz“ für „Zyklizität“ verstanden und auch als solche aktiv verwendet.<sup>197</sup>

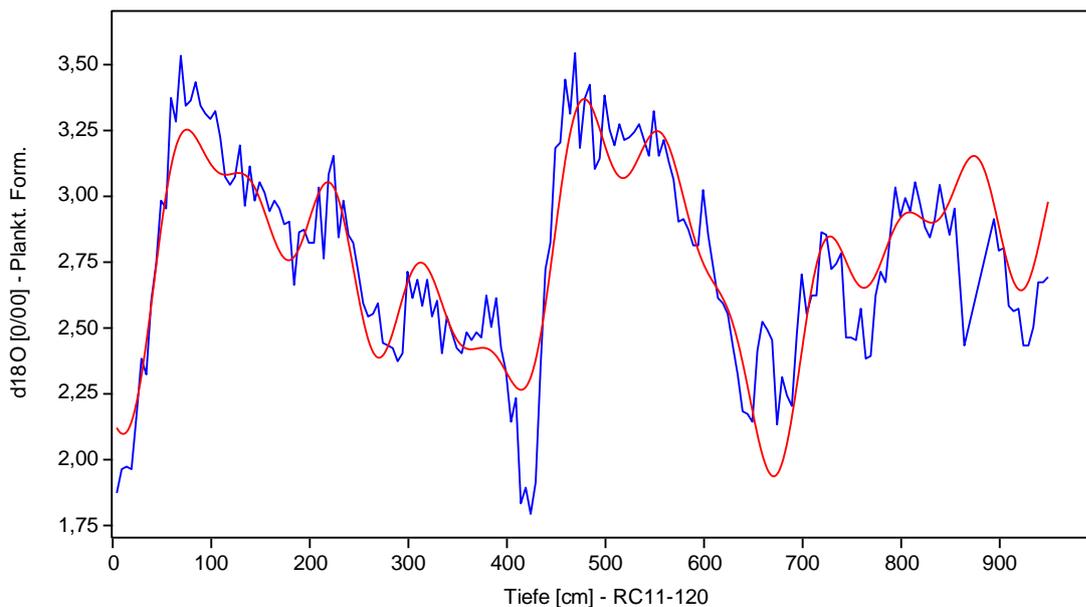
<sup>196</sup> Eines oszillierenden Systems bzw. *wahr* im wissenschaftstheoretischen Sinne.

<sup>197</sup> WEEDON (1991, 840) nennt einige wichtige Limitierungen der Spektralanalyse stratigraphischer Zeitreihen. Bemerkenswert ist die Aussage, dass das Verfahren nicht dazu verwendet werden kann, einen Zusammenhang zwischen klimatischen und sedimentären Zyklen zu *widerlegen*. Er begründet dies damit, dass für Zeitreihen-haltige Spektren eine Dicken-Skala (Zyklen pro Meter) anstelle einer Zeit-Skala (Zyklen pro tausend [radiometrische] Jahre) Verwendung finde. Die originäre lineare Beziehung zwischen Zeit und (Sediment-) Dicke könne aber durch geologische Prozesse zerstört sein. Diesen Aspekt bezieht er allerdings nur auf „präpliozäne stratigraphische Zeitreihen.“ – Die Konstruktion dieser Inversion zeigt, dass WEEDON – wie viele andere auch – *a priori* von Langzeit-Variationen der Erdbahnparameter ausgeht, die ihren Niederschlag grundsätzlich in der sedimentären Überlieferung findet (die „Tatsachen“-Lage, siehe Abschnitt 6.4), wenn sie nicht durch (andere) geologische Prozesse verwässert oder gar zerstört ist. Diese Philosophie prägt auch



**Abb. 39**  $\delta^{18}\text{O}$ -Reihe mit einfacher sinusoidaler Passung (Kern RC11-120).

Die einfache Passung, nur mit Periode 360 cm, macht aus der asymmetrisch-rhythmischen Reihe (blau) einen gleichmäßigen Zyklus (rot); Diskussion siehe Textteil. Liniendarstellung,  $n = 183$ ; Datei: rc11120i.stretch.



**Abb. 40**  $\delta^{18}\text{O}$ -Reihe mit vierfacher sinusoidaler Passung (Kern RC11-120).

Die vierfache Passung (rot), mit Perioden von 360/227/129/82 cm, scheint die asymmetrisch-rhythmischen Reihe (blau) gut abzubilden (vgl. Abb. 35). Im Detail sind die Ausprägungen aber anders und die Minima und Maxima teilweise gegenläufig; Diskussion siehe Textteil. Liniendarstellung,  $n = 183$ ; Datei: rc11120i.stretch.

sein Buch *Zeitreihenanalysen und Zyκλοstratigraphie*. In der Einführung heißt es u. a. (WEEDON 2003, 1): „In zyκλοstratigraphischen Daten ist das Umwelt-Signal, welches während der Sedimentation ‚codiert‘ wurde, häufig zu einem gewissen Ausmaß von Unterbrechungen korrumpiert, die von Prozessen herrühren, die nicht Teil des normalen Sedimentationssystems sind. Solche Prozesse, für Sedimente, schließen Ablagerungsstillstand [non-deposition], Erosion, Meeresboden-Auflösung oder Ablagerung von Ereignis-Lagen ein (...).“

Wird bei einem ersten Spektral-Check beispielsweise die  $\delta^{18}\text{O}$ -Wertereihe des Kerns RC11-120 (Abb. 11a) unverändert belassen, zeigen sich bei einem Signifikanz-Level  $\geq 95\%$  drei Peaks mit Perioden von 3,59/2,22/1,26 m (Abschnitt 5.3). Dieser Rohdatenreihe liegt aber bereits die Vorstellung (Modell) einer gleichförmigen, stetigen Sedimentation in einem kontinuierlichen Profil zugrunde (Stichprobe mit gleichen Probenintervallen). Wird allerdings eine episodische (rhythmische) Sedimentation mit Sedimentationsunterbrechungen angenommen<sup>198</sup>, ohne diese quantifizieren zu können, ist die Wertereihe Zeitreihen-analytisch nicht behandelbar (und scheinbar wertlos).

Da die zugrundeliegenden Alters- und/oder Sedimentationsmodelle nicht abschließend verifiziert werden können, können auch keine *wahren Zyklen* ausgeschieden werden. Werden die Werte-Reihen im geologischen Gesamtkontext betrachtet, insbesondere die abrupten Wechsel (Lithologie, Konzentration etc.), scheint eine (harmonische) Zyklicität als sehr unwahrscheinlich.

### 6.3 Orbitales (Milankovitch-) Tuning: Von der Theorie zum Zirkelschluss

Das ursprüngliche Ziel von HAYS et al. (1976) war, eine bereits bestehende Zeitskala feinabzustimmen. Idee und Methode wurden in unterschiedlichen Ausprägungen weiterentwickelt; einige Beispiele wurden in dieser Arbeit diskutiert: Prototyp SPECMAP für das Obere Pleistozän (IMBRIE et al. 1984, Abschnitt 4.5), Weiterentwicklung für das Plio-Pleistozän (LISIECKI & RAYMO 2005), Land-basierte Rossello-Kompositprofil für das Pliozän (LOURENS et al. 1996), permische Sedimentfolge (WU et al. 2013) oder die Fein-Abstimmung der jurassischen Toarcium-Stufe (BOULILA et al. 2014).

Beim Orbitaltuning werden zeitkalibrierte (stratigraphische) Wertereihen, also radiometrisch-begründete, initiale Zeitreihen, auf theoretische Orbitalperioden (Milankovitch-Zyklen) getunt (eingephasst). Dabei werden die ursprünglichen Daten bzw. Datenreihen, häufig in zahlreichen Zwischenschritten, signifikant verändert.<sup>199</sup> Die schließlich erreichte, hohe Übereinstimmung („Gleichphasung“) mit der Zielkurve wird von einigen Bearbeitern als Nachweis für das Vorliegen von Milankovitch-Zyklen betrachtet (z. B. IMBRIE et al. 1984). Das ist ein Zirkelschluss. Es ist lediglich ein Maß für die Güte des Tunings selbst.

Auch bestätigt die Wostok-Zeitskala (GT4) nicht – wie geglaubt – eine Orbitalsteuerung (PETIT et al. 1999). Der Zirkelschluss hier kommt zustande, weil bereits durch die Datierung (die Angleichung an die astronomisch-kalibrierte marine Isotopenkurve, MIS) eine Imprägnation mit Milankovitch-Periodizitäten erfolgte; das ist der Grund, warum sich die [theoretische] Insolationsskurve und die GT4-Zeitskala „ähneln“. Dieses Phänomen ist allerdings erst

---

<sup>198</sup> Beispielsweise als Endglieder von sedimentgeladenen Bodenströmen infolge von Fluteinträgen; siehe die Tiefseesedimente (der Ebenen) der Lake-Missoula-Flut (NORMARK & REID 2003).

<sup>199</sup> Hierzu MULLER & MACDONALD (2000, 175) zu sogenannten über-tunten (overtuning) Wertereihen: „It is very dangerous to draw any conclusions by examining data that has been so heavily adjusted to match a preconceived idea of what it should contain.“ – Das Problem besteht nach Ansicht des Verfassers aber grundsätzlich.

rund 20 Jahre nach HAYS et al. (1976) erkannt bzw. anerkannt worden (SHACKLETON et al. 1995).<sup>200</sup>

Das Beispiel von Wu et al. (2013) zeigt, dass es letztendlich gar nicht eines astronomischen Modells bedarf, um eine Feinabstimmung (Segmentierung) der geologischen Zeitskala zu erwirken. Sie haben 405-ka-Segmente („Zyklen“) in radiometrisch-zeitkalibrierten Sedimentfolgen – ohne astronomisches Modell – konstruiert und schließen daraus, dass eine entsprechende Orbitalsteuerung auch im Oberperm vorgelegen habe. Auch hier liegt ein Zirkelschluss vor.

Einige Bearbeiter vollziehen eine konsequente astronomische Kalibrierung und verwenden ihre vermeintliche Identifizierung von Milankovitch-Periodizitäten nicht für den expliziten Nachweis einer Orbitalsteuerung; sie wird *a priori* vorausgesetzt (z. B. WESTERHOLD et al. 2008, BOULILA et al. 2014).

#### 6.4 Orbitale (Milankovitch-) Steuerung: Von einer Mutmaßung zu einer Tatsache

„(...) die Realität der orbitalen Steuerung des Klimas wurde [in den 1970er-Jahren, M. K.] als Tatsache festgeschrieben“.<sup>201</sup> Diese Aussage von HOUSE & GALE (1995) steht im Vorwort der Publikation *Orbital Forcing Timescales and Cyclostratigraphy*. Es ist eine von zahlreichen „Tatsachen“-Aussagen zur Milankovitch-Steuerung des Klimas der Vorzeit. Sie bezieht sich hinsichtlich des genannten Zeitpunkts insbesondere auf die sogenannte „Pacemaker“-Studie von HAYS et al. (1976) (Abschnitt 5.3).

Die Milankovitch-Theorie scheint nicht nur weithin anerkannt, sondern es erweckt den Eindruck, als würde die Mehrheit der mit ihr mittelbar oder unmittelbar beschäftigten Wissenschaftler – Paläoklimatologen, Zyklusstratigraphen, Astrochronologen etc. – sie als Realität betrachten und behandeln. Es gibt zahllose Aussagen, die gleichermaßen eine geologische Faktenlage zeichnen.<sup>202</sup>

<sup>200</sup> So auch STRASSER et al. 2006, 101: „A disadvantage of astronomical tuning to establish palaeoclimatic time series for time series analysis is that frequencies of the target curve are automatically introduced in the time series (e. g., SHACKLETON et al. 1995). Nevertheless, tuning remains a very powerful tool to study phase relations between the initial forcing and its recording in the sediments.“

<sup>201</sup> Das Zitat im Kontext (HOUSE & GALE 1995, Preface): „The discovery in the 1970s that Pleistocene climates and especially ice-age development were controlled by identifiable orbital parameters in the Milankovitch Band, confirming the views of Milutin Milankovitch in the 1920s, is probably the greatest single advance in palaeoclimatology this century. Changes in temperature recorded by isotopes in calcite of deep-sea foraminifer tests provided a detailed record of ice-sheet advance and decay moderated by precession, obliquity and eccentricity cycles (19-400 ka). As a consequence of this work, the reality of orbital forcing of climate was established as a fact.“

<sup>202</sup> Kursiv, Hervorhebung durch den Verfasser:

- „Zahlreiche Studien haben erfolgreich demonstriert, dass Orbital-Zyklen *wirklich* [‘indeed’, M. K.] *aufgezeichnet sind* und für die Verbesserung der Zeiteinteilung der Erdgeschichte verwendet werden können“ (STRASSER et al. 2006, 81).

- „Die Pionierstudien von HAYS et al. (1976) und die Meilenstein-Artikel in A. BERGER (1984) *bewiesen* [‘established’, M. K.], dass MF [Milankovitch-Steuerung, M. K.] in der Überlieferung *gegenwärtig ist* und für Tuning (d. h. für eine detaillierte Alterszuweisung) verwendet werden kann“ (BERGER 2013, 2003). – BERGER

MIALL & MIALL (2004) analysierten die Entwicklung der „Milankovitch-Theorie“ anhand eines von LATOUR & WOOLGAR (1986, 76-80) vorgeschlagenen Prozederes, dem eine (hierarchische) Klassifikation wissenschaftlicher Aussagen (statements) zugrunde liegt:

Typ 1: Mutmaßungen und Spekulationen

Typ 2: Forderungen von Beziehungen oder Aussagen von vorläufigen Beziehungen zwischen wissenschaftlichen Tatsachen/Prozessen

Typ 3: Aussagen, die Referenzen zu früheren Arbeiten beinhalten, um eine vorgeschlagene Beziehung zu unterstützen

Typ 4: Lehrbuch-artige Aussagen von etablierten Tatsachen oder Beziehungen

Typ 5: Als erwiesen angenommene Tatsachen, die keiner unterstützenden Referenz bedürfen

Sie stellen fest, dass die „Milankovitch-Theorie“ – angewendet auf die gesamte geologische Überlieferung – eine Wandlung von einer Typ-1-Mutmaßung zu einer Typ-4-Aussage etablierter Tatsachen erfuhr. Sie zeigen insbesondere auf, dass – ausgehend von den Studien von FUCHS (1992), LATOUR & WOOLGAR (1986) und LATOUR (1987) – „Prämissen als unproblematisch produziert“ wurden und durch weitere Anwendung dieser Praktiken ein Beitrag zur „Transformierung in Tatsachen“<sup>203</sup> geleistet worden sei.

In ihrer Zusammenfassung resümieren MIALL & MIALL (2004, 40), dass die „Milankovitch-Theorie“ eine Umkehrung erfahren habe: Zu Beginn versuchten die Forscher geologische Daten zu verwenden, um den Umfang zyklischer klimatischer Periodizitäten der geologischen Vergangenheit zu untersuchen; mit einer Sicht der Prüfung des Zeugnisses für das Vorhandensein einer orbitalen Signatur. Nunmehr sei die Demonstration zyklischer Perioden, die ungefähr in das „Milankovitch-Band“ fallen, für die Forscher genug, festzustellen, dass der kontrollierende Mechanismus orbitale Steuerung gewesen war. Anfängliche Warnungen bezüglich des Verständnisses über die Unvollständigkeit der geologischen Überlieferung seien einer Prädisposition gewichen, die Macht der Zeitreihenanalyse zu respektieren, die erwarteten Signale zu generieren.

---

(1984) bezieht sich auf den Sammelband, bei welchem BERGER als Hauptherausgeber auftritt; siehe beispielsweise unter IMBRIE et. al (1984).

- „(...) zeigen die Resultate von Zeitreihenanalysen, und die Konsistenz mit magnetobiostratigraphischen und/oder radio-isotopischen Altersmodellen, dass Milankovitch-Zyklen nicht nur in Tiefsee- und limnischen Folgen, sondern auch in Eiskernen und Speleothemen und in äolischen und fluviatilen Folgen *aufgezeichnet sind*“ (HILGEN et al. 2014).

<sup>203</sup> „[Damit eine Aussage, M. K.] zur Tatsache wird, muss eine Aussage die Konditionen bestimmen, unter welche andere Aussagen, die von anderen Leuten gemacht werden, möglich sind. Das heißt, eine wissenschaftliche Aussage muss von anderen Wissenschaftlern als Basis oder Startpunkt ihrer eigenen Arbeit akzeptiert werden (...) Je mehr andere Wissenschaftler eine Aussage als Prämisse nutzen, auf welche sie ihre eigenen Aussagen aufbauen, um so mehr wandeln sie diese Aussage in eine unproblematische Black Box und zu einer unbestrittenen Grundlage weiterer wissenschaftlicher Arbeit. Wissenschaftler tun dies bis zu einem Ausmaß von dem sie überzeugt sind, dass ihre eigene Arbeit von einer Aussage abhängt. Wie LATOUR & WOOLGAR (1986, 259) ausführten: ‚Die Aktivität der Schaffung Schwarzer Boxen [Black Boxen, M. K.], der Wiedergabe der Elemente des Wissens separiert von den Umständen ihrer Erschaffung, ist genau das, was Wissenschaftler den Großteil der Zeit beschäftigt.‘“

### ***Suggestivwirkung der Arbeit von HAYS et al. (1976)***

MIALL & MIALL (2004) bewerten die Meilenstein-Arbeit von HAYS et al. (1976) als vorsichtig (cautious), mit zahlreichen Aussagen vom Typ 2 und Typ 3 (s. o.). Die „Pacemaker-Studie“ aber ist mehr; sie ist zielgenau auf die Erwartungshaltung der Wissenschaftsgemeinschaft ausgerichtet. Mit ihrer suggestiven Beweiskraft transformieren die Autoren die Orbital-Theorie quasi zu einer Tatsache (siehe Abschnitt 5.3), ihre Unterüberschrift lautete: „Für [die vergangenen, M. K.] 500.000 Jahre sind bedeutende klimatische Änderungen den Variationen von Obliquität und Präzession gefolgt.“ Das ist eine (vorausgenommene) Typ-4-Aussage.

Nichtsdestotrotz, aus (geo-) wissenschaftstheoretischer Perspektive hat die „Pacemaker-Studie“ unter allen Arbeiten mit Abstand den höchsten Reifegrad.

## **6.5 Datierung mit astronomischen (Milankovitch-) Zyklen?**

Die Tatsachen- bzw. Faktenlage (Abschnitt 6.4) drückt sich auch in der Aussage von HINNOV & OGG (2007, 239) aus, dass die astronomisch kalibrierte geologische Zeit mit einer (zeitlichen) Auflösung von 0,02 bis 0,40 Millionen [radiometrischen] Jahren ein bedeutender Durchbruch für die Geowissenschaften sei. Die Anwendung der Zyκλοstratigraphie in Verbindung mit der Astrochronologie hat als „wichtige Innovation“ erstmals 2004<sup>204</sup> ihren Niederschlag in der internationalen Geologischen Zeitskala (GTS2004) gefunden.

Bemerkenswert ist der den [theoretischen] „astronomischen Zyklen“ zugewiesene Stellenwert für die Konstruktion der Geologischen Zeitskala (GTS): Zur absolut-zeitlichen Kalibrierung der Stratigraphischen Tabelle werden neben den radiometrischen Altern, den „absolute ages; Ar-Ar, U-Pb“, (erstmalig) quasi gleichberechtigt die [theoretischen] langperiodischen Milankovitch-Zyklen, die „astronomical cycles“, aufgeführt (GRADSTEIN 2004, 3, Fig. 1.1; in der Folge GRADSTEIN 2012, 2, Fig. 1.1). Die „astronomischen Zyklen“ werden als Geochronometer eingesetzt; die Alter der konstruierten Astronomischen Zeitskala (ATS) werden ebenso als absolut<sup>205</sup> verstanden wie die radiometrischen Alter der Geologischen Zeitskala.

Gemäß der Aufgabenstellung der Zyκλοstratigraphie, die astronomischen Zyklen zur Datierung der sedimentären Überlieferung zu nutzen (Abschnitt 2.2), und der Astrochronologie, eine durchgängige Astronomische Zeitskala für das Käno- und Mesozoikum aufzubauen (Abschnitt 2.5), gleichermaßen auch als Auftrag der Internationalen Stratigraphischen Kommission ICS (HINNOV & OGG 2007), werden Sedimentfolgen und ihnen zugewiesene stratigraphische Stufen sukzessive mit [theoretischen] astronomischen Zyklen (fein-) kalibriert. Parallel zu der formalen Aufgabe hat die Durchdringung mit Arbeiten zyκλοstratigraphischer Schwerpunkte weiter zugenommen, sogar bis auf die Ebene von Bachelorarbeiten.

<sup>204</sup> Zu diesem Zeitpunkt war bereits das gesamte Quartär und Neogen (bis 23 Millionen [radiometrische] Jahre) mit [theoretischen] astronomischen Zyklen (fein-) kalibriert.

<sup>205</sup> „Astronomical time scale (ATS). A geological time scale with absolute ages derived from the calibration of sedimentary cycles and other cyclic variations in sedimentary successions to astronomical time series“ (STRASSER et al. 2006, 103).

Diese geschäftsmäßige Abarbeitung erfolgt, obwohl die Milankovitch-Theorie nicht bewiesen ist und bisher kein Nachweis darüber erbracht wurde, dass die stratigraphische Überlieferung durch eine lang-periodische Orbitalsteuerung (Milankovitch-Zyklen) beeinflusst worden ist.

BERGER (2012, 24-25) schließt seinen leicht (selbst-) kritischen Beitrag *Milankovitch Theory – Hits and Misses* u. a. mit den Aussagen, dass die Milankovitch-Theorie ihre Nützlichkeit in der Datierung quartärer und älterer Sedimente bewiesen habe und ihre Berechtigung in der (wie auch immer vorläufigen) Erklärung der beobachteten Fluktuationen der Sauerstoffisotopen und anderer Proxies finde<sup>206</sup>. Und weiter: Vorausgesetzt, dass die Theorie korrekt ist, sei dadurch die Zuweisung von Altern von paläomagnetischen Polaritätswechsel erlaubt, die durch die radioaktive Datierung verifizierbar seien (JOHNSON 1982, SHACKLETON et al. 1990, HILGEN 1994)<sup>207</sup>; quasi eine Bestätigung der Milankovitch-Theorie.

Es erweckt den Eindruck, als sei die *astrochronologische Methode*, die Ziel-Eichung (vermeintlich) zyklischer Sedimentfolgen auf die astronomische Skala (Abschnitt 2.5), eine unabhängige (eigenständige) und absolute Altersbestimmungsmethode. Das ist aber nicht der Fall wie die zahlreichen hier vorgestellten Beispiele zeigen. Es handelt sich ausschließlich um Feinkalibrierungen (auch Feinadjustierungen) im Rahmen radiometrischer Alterswerte. In diesem Sinne ist die astrochronologische Methode eine Sekundärmethode in Bezug auf die radiometrische Altersbestimmung (Primärmethode). Ohne Nachweis einer Milankovitch-Steuerung ist die Feinkalibrierung eine fiktive Unterteilung (Segmentierung) in Einheiten von bspw. 21, 41 oder 405 Tausend radiometrischen Jahren. Die astrochronologische Methode ist demnach weder unabhängig noch absolut; mangels Nachweis ist sie eine scheinbare Altersbestimmungsmethode. Die Astronomische Zeitskala ist folglich eine fiktive Zeitskala.

Mit Bezug auf HINNOV & OGG (s. o.) ist die „astronomisch kalibrierte geologische Zeit“ eine feinkalibrierte geologische Zeit im Rahmen radiometrischer Alterswerte mit [theoretischen] astronomischen Zyklen. Hinsichtlich BERGERS „Datierung“ (s. o.) ist zwischen der Primär- und Sekundärdatierung zu unterscheiden. Sein zweiter Punkt, die positive Verifizierung (Bestätigung) astrochronologischer Datierungen von paläomagnetischen Ereignissen durch die radiometrische Methode mündet in einen Zirkelschluss. Denn die radiometrische Methode verifiziert eine vermeintliche (unabhängige) astrochronologische Methode nicht; ist doch die astrochronologische Methode von der radiometrischen Methode abhängig.

Zum Verstehen der Konstruktion der Geologischen Zeitskala<sup>208</sup> fordern ihre Architekten, vertreten durch GRADSTEIN (2012, 1), explizit auf: „Die [Geologische, M. K.] Zeitskala ist das Werkzeug ‚par excellence‘ des geologischen Geschäftes, und Einsichten in ihre Konstruktion, Stärken und Limitierungen steigern die Funktion und Nützlichkeit außerordentlich. Alle Geowissenschaftler sollten verstehen, wie sich die Zeitskalen kontinuierlich entwickelt haben und wie ihre Myriaden von physikalischen und abstrakten Daten kalibriert sind, als lieber

<sup>206</sup> „Milankovitch Theory, having proven its usefulness in the dating of Quaternary sediments and beyond, and in the explanation (however tentative) of the observed fluctuations in oxygen isotopes and other proxies, is here to stay.“

<sup>207</sup> „Assuming that the Theory is correct allows the assignment of paleomagnetic reversal ages that are verifiable by radioactive dating (Johnson, 1982; Shackleton et al., 1990; Hilgen, 1994) (...)“.

<sup>208</sup> Die Astronomische Zeitskala ist auch eine geologische Zeitskala, siehe Fußnote 205.

ihre Zahlen in ihr bloß anzuwenden, [ab]gelesen von einer zweckdienlichen Wandtafel oder einer laminierten Taschenkarte.“<sup>209</sup> Hinsichtlich der Astronomischen Zeitskala auf Basis der astrochronologischen Methode<sup>210</sup> liegt nicht nur eine starke Limitierung vor, sie ist fiktiv. Die dennoch konstruierte Astronomische Zeitskala kann allenfalls als Derivat der Geologischen Zeitskala betrachtet bzw. verstanden werden.

## 7 Zusammenfassung

- (1) Die Idee, gewisse sich wiederholende Muster in der sedimentären Überlieferung als Ausdruck wechselnden Klimas zu deuten und diese gedeuteten Klimawechsel theoretischen langperiodischen Oszillationen der Erdparameter zuzuschreiben (orbitale Steuerung des Klimas), entwickelte sich in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts (z. B. GILBERT 1895).
- (2) Die A-priori-Annahme eines einfachen linearen Systems, „orbitaler Input → klimatischer Output“ bzw. „Insolation → Klima → sedimentäre Überlieferung“, für die geologische Vergangenheit ist spekulativ und bisher nicht verifiziert worden.
- (3) Mit der A-priori-Annahme eines einfachen linearen Systems (Punkt 2) wird eine mögliche „Überprüfung“ impliziert, nämlich die Suche nach – als Klimaindikatoren ausgewiesenen – Proxies, die ein entsprechendes (korrelierbares) Zeit-periodisches Verhalten aufweisen. Dabei handelt es sich um einen Zirkelschluss. Denn zuvor ist das künstliche, simple „orbital-geologisches Universum“ geschaffen worden, um es so dann einem einfachen, dafür konstruierten (geologischen) Test einer eigenkonstruierten Beweisführung unterziehen zu können.
- (4) Das „stratigraphische System“ weist – sowohl hinsichtlich der „Verarbeitung“ als auch des Outputs – deutlich alle Charakteristika nichtlinearer Dynamik auf. Es ist unwahrscheinlich, dass die stratigraphische Überlieferung als Produkt eines solchen nichtli-

<sup>209</sup> Im Original: „The time scale is the tool ‘par excellence’ of the geological trade, and insight into its construction, strengths, and limitations greatly enhances its function and its utility. All earth scientists should understand how the evolving time scales are constructed and how their myriad of physical and abstract data are calibrated rather than merely using the numbers in them, plucked from a convenient wall chart or laminated wallet card.“

<sup>210</sup> In diesem Zusammenhang der Verweis auf eine weitere interessante Aussage BERGERS (2012, 25): „Zurzeit gibt es einfach keine andere Theorie, die den Input definiert. Wenn nur der Output verfügbar ist (in Form der geologischen Überlieferung), führt das Anstellen von Vermutungen direkt in einen (nutzlosen) Zirkelschluss.“ Mit der Berechnung (Rückrechnung) theoretischer Langzeit-Variationen der Erdbahnparameter werden Zeitreihen (astronomische Modelle) generiert, die aufgrund ihrer quantitativen Natur als einzig validen Input betrachtet werden. Das kann aber keine Begründung dafür sein, alle anderen Deutungsmöglichkeiten quasi auszuschließen. Mit dieser Vorgehensweise haben sich die Protagonisten in eine Sackgasse manövriert. Die Theorie hat aber scheinbar schon einen Großvater-Status (grandfather status) erreicht und ist mangels einer „kompetenten Konkurrenz“ (BERGER 2012, 25) unangefochten. BERGERS Aussage aber zeigt letztendlich den Zirkelschluss auf: In der Tat ist nur der Output verfügbar. Der Output wird so interpretiert, dass er zum gewünschten Input passt, ergo ist der Input korrekt (vgl. auch Abschnitt 6.1).

nearen (chaotischen) Systems ein eingehendes (schwaches) Signal – wie das der Insolation – quasi 1:1 (linear, vgl. Punkt 2) abgebildet hat.

- (5) Periodenübereinstimmungen und Verhältniszahlen sind für einen Nachweis orbitaler Kontrolle wertlos: Kalkulierte Perioden (mittelskaliger) sedimentärer Zyklen fallen geradezu zwangsläufig in das Milankovitch-Frequenzband<sup>211</sup>. Eine Milankovitch-Band-Periodizität braucht nicht mit einer Orbitalsteuerung gleichgesetzt werden; alternative Mechanismen können „Zyklen“ erzeugen (u. a. Autozyklizität). Verhältnisse von Periodizitäten zueinander (unabhängig, ob Dicke oder Zeit gewählt wird) sind wertlos, da zu viele Verhältnisse zwischen Paaren von Periodizitäten vorliegen, die von der astronomischen Theorie vorhergesagt werden.
- (6) Beim Orbitaltuning werden zeitkalibrierte (stratigraphische) Wertereihen, also initiale Zeitreihen, auf theoretische Orbitalperioden (Milankovitch-Zyklen) getunt (eingephasst). Die dabei erreichte, hohe Übereinstimmung („Gleichphasung“) mit der Zielkurve wird von einigen Bearbeitern als Nachweis für das Vorliegen von Milankovitch-Zyklen betrachtet. Das ist ein Zirkelschluss.
- (7) Die Anwendung der Zeitreihenanalyse, insbesondere der spektralen Analyse, zur Ermittlung bzw. Aufdeckung von Zyklen erfolgt zielgerichtet. Durch eine Reihe von Maßnahmen können begünstigende<sup>212</sup> Umstände für den Ausweis von mehr und ggf. signifikanzverstärkenden Signalen („Zyklen“) geschaffen werden; z. B. durch die Datenvor- und -aufbereitung, die Wahl der spektralen Darstellung/des Schätzmodells, die Wahl der Parameter, durch subjektive Bereinigung, visuelle Betonung und Wahl der Signifikanz-Level.
- (8) Die spektrale Analyse kann *wahre* Zyklen nicht identifizieren. Bei den Wertereihen („Zyklen“/m), insbesondere aber bei den Zeitreihen („Zyklen“/Zeiteinheit) sind das Alters- und/oder das Sedimentationsmodell maßgeblich; beide Modelle beruhen auf substantiellen, nicht verifizierbaren Annahmen.
- (9) Die spektrale Analyse kann Zyklen nicht abschließend beweisen. Durch die Modell-Transformation in eine Sinusfunktion erfolgt eine „Mittelung“ und „Abstrahierung“; die spektrale Darstellung bezieht sich nicht auf die konkreten Rohdaten, sondern auf die zuvor errechnete Sinusfunktion („Welle“), die Schätzung. Abrupte Wechsel, Asymmetrien, rhythmische Charakteristika etc. verlieren so ihre Bedeutung; Mittelung und Abstrahierung können eine begünstigende Aufwertung zu (reiner) Zyklizität bewirken.
- (10) Der Zyklostratigraphie und der Astrochronologie liegt implizit die A-Priori-Annahme einer *Realität* von Langzeit-Variationen der Erdbahnparameter zugrunde, die möglicherweise die gesamte geologische Spanne des Phanerozoikums umfassen<sup>213</sup>. Maß-

---

<sup>211</sup> Unter der Voraussetzung einer Gleichsetzung astronomischer und radiometrischer Alter.

<sup>212</sup> Und damit ggf. irreleitende Umstände.

<sup>213</sup> Eine Stabilität wird für den theoretischen langen Exzentrizitätszyklus angenommen.

geblich hierfür ist eine weitere A-priori-Annahme, dass die radiometrisch geeichte Geologische Zeitskala valide ist und die radiometrischen Alter mit Realalter gleichgesetzt werden können<sup>214</sup>.

- (11) Die orbitale Steuerung des [pleistozänen] Klimas als Realität zu bezeichnen und als Tatsache festzuschreiben ist aus wissenschaftstheoretischer Sicht befremdlich.

Insgesamt ist festzuhalten, dass ein Nachweis von Milankovitch-Zyklen (bzw. lang-periodischer Orbitalsteuerung) in der stratigraphischen Überlieferung bisher nicht erbracht worden ist. Dies bezieht sich insbesondere, aber nicht ausschließlich auf die systematisch-methodische Vorgehensweise der Zuweisung und des Tunings.

## 8 Schlussfolgerung

- (1) Die *Milankovitch-Theorie* ist nicht bewiesen. Ein Nachweis darüber, dass die stratigraphische Überlieferung durch eine lang-periodische Orbitalsteuerung (*Milankovitch-Zyklen*) beeinflusst wurde, ist bisher nicht erbracht worden. Die methodischen Zuweisungen basieren auf einer zufälligen bzw. zwangsläufigen Übereinstimmung von Milankovitch-Band-Periodizität (im Rahmen der radiometrischen Skalierung) und bisher nicht verifizierten A-priori-Annahmen.
- (2) Demnach ist die *Astrochronologische Methode*, die Ziel-Eichung (vermeintlich) zyklischer Sedimentfolgen auf die astronomische Skala, eine scheinbare Altersbestimmungsmethode. Die durch die Methode zielgerichtete, erwirkte Befüllung und Belegung dieser theoretischen Zeitskala ist virtueller Natur. Im Grunde genommen erfolgt lediglich eine Segmentierung der radiometrisch begründeten Skala in Einheiten von bspw. 21, 41 oder 405 Tausend radiometrischen Jahren.
- (3) Die *Astronomische Zeitskala (ATS)* – auf Basis der *Astrochronologischen Methode* – ist eine fiktive Zeitskala. Sie kann allenfalls als uneigenständiges Derivat der Geologischen Zeitskala (GTS) betrachtet werden. Demzufolge ist die *Astronomische Zeitskala* keine unabhängige und absolute Zeitskala neben der Geologischen Zeitskala; sie kann die radiometrisch begründete Geologische Zeitskala nicht verifizieren (bestätigen).

## 9 Verzeichnis der Abkürzungen

**AR(1):** Autoregression 1. Ordnung. Dem statistischen Modell liegt folgende Annahme zugrunde: der Ist-Wert einer Zeitreihe hat eine direkte Auswirkung auf den Folgewert. Die AR-(1)-Linie im Power-Spektrum repräsentiert das angepasste „rote Spektrum“ (Hintergrundspektrum).

---

<sup>214</sup> Siehe aber KOTULLA (2014).

**BTM:** BLACKMAN-TUKEY method, BLACKMAN-TUKEY-Methode; eine Standardmethode der Spektralschätzung (BLACKMAN & TUKEY 1958).

**FFT:** fast FOURIER transform, schnelle FOURIER-Transformation.

**GSSP:** Global Boundary Stratotype Section and Point, Stratotypusektion und -punkt einer globalen (stratigraphischen) Grenze. Temporäre Festlegung von stratigraphischen Referenzpunkten; ein formales Prozedere der → ICS und → IUGS.

**GTS:** Geologic Time Scale, Geologische Zeitskala; angehängte Jahreszahl (z. B. GTS2012) weist auf das Datum der Veröffentlichung/des Standes der Zeitskala.

**ICS:** International Commission on Stratigraphy [<http://www.stratigraphy.org/>], Internationale Stratigraphische Kommission.

**IUGS:** International Union of Geological Sciences [<http://www.iugs.org/>]; „Internationale Vereinigung der Geologischen Wissenschaften“. Deutsches Nationalkomitee für die IUGS, siehe: <http://www.bgr.bund.de/DE/Allgemeines/Kooperation/DNK-IUGS.html>.

**k. A.:** kein Angabe.

**MEM:** Maximum entropy method, Maximum-Entropie-Methode (auch Maximum-Entropie-Spektralanalyse, MESA); eine Standardmethode der Spektralschätzung. Erzielt im Vergleich zu ASA (Autokorrelations-Spektralanalyse) ggf. eine bessere Auflösung im tieffrequenten (langperiodischen) Bereich des Spektrums zu Lasten einer handhabbaren Signifikanzprüfung.

**MTM:** Multi-taper method, Multitaper-Methode; eine Standardmethode der Spektralschätzung.

**TC:** total carbon, Gesamtkohlenstoffgehalt.

**TOC:** total organic carbon, gesamter organischer Kohlenstoffgehalt.

**USGS:** United States Geological Survey, geologische Dienst der USA (bzw. der US-Administration).

## 10 Glossar

**Anhysteretische remanente Magnetisierung (ARM):** ARM ist keine der natürlichen Remanenztypen; sie wird durch ein auf die Probe wirkendes magnetisches Wechselfeld erzeugt. ARM misst die Konzentration feinkörniger, ferromagnetischer Minerale (mit niedriger Koerzitivfeldstärke); im Vergleich zu → MS wird ARM als ein besserer → Proxy für zyклоstratigraphische Studien von Sedimentfolgen angesehen. SI-Einheit:  $\text{Am}^2\text{kg}^{-1}$ .

**Akkumulation, akkumuliert:** (An)sammlung, (an)gesammelt.

**Eiskernchronologie:** Abfolge definierter Ereignisse im Eiskern, hier im engeren Sinne: „jahr“-genaue Chronologie durch Datierung der Ereignisse.

**Filterung (Zeitreihen-):** Tiefpassfilterung: „Passierenlassen“ tiefer Frequenzen, Unterdrückung (relativ) hoher Frequenzen (kleiner Perioden) zur Hervorhebung (relativ) niedriger Frequenzen (langer Perioden); Hochpassfilterung: „Passierenlassen“ hoher Frequenzen, entsprechend umgekehrt zu Tiefpassfilterung; Bandpassfilterung: Hervorhebung bzw. Ex-

traktion eines bestimmten Frequenz- bzw. Periodenintervalls; bei Ersterem Unterdrückung der anderen Frequenzen.

**Gamma-Ray-Log (GR):** Messung der natürlichen Radioaktivität.

**Irrtumswahrscheinlichkeit:**  $\alpha = 1$ -Signifikanz; beim Lomb-Periodogramm Level von 0,05 und 0,01, die einem Konfidenz-(Vertrauens-)Level von 95 % bzw. 99% entsprechen.

**Laminae:** Mehrzahl von Lamina (Lamine), Laminen. Hier feine Schichtlagen mit Mächtigkeiten bis maximal 1 cm.

**Lithologisch:** Die Lithologie (Gesteinskunde) betreffend; umfasst auch weitere Merkmale, z. B. Gefüge, Schichtung.

**Konfidenz-Level:** Sicherheit der Schätzaussage, auch Konfidenzniveau oder Signifikanz-Level.

**Magnetische Suszeptibilität (MS):** Erwerb einer induzierten Magnetisierung durch ein äußeres (angelegtes) Magnetfeld; einheitenlose physikalische Größe, ein Hinweis auf das Einheitensystem, hier SI, aber ist notwendig.

**Marin:** Das Meer betreffend; bezieht sich auf im (oder durch das) Meer (verursachte) ablaufende Prozesse und Bildungen.

**Marine Isotopenstufen (MIS):** Auch Sauerstoffisotopenstufen (OIS); Gliederung der abstrahierten Sauerstoffisotopen-Chronologie in Stufen (Oszillationen interpretiert als relativ wärmere bzw. relativ kältere Perioden) von der Gegenwart bis über die Grenze des Pleistozän/Pliozän hinaus (Grenze: Stufe 104/G1), aktueller Standard LR04 (LISIECKI & RAYMO 2005).

**Paläoklima:** Das Klima der Vorzeit. Nach IPCC (2007): „Das *Klima* in Zeiten vor der Entwicklung von Messinstrumenten, einschließlich historische und geologische Zeiträume, für die nur [→] Proxy-Klimamessreihen verfügbar sind.“

**Periodogramm:** Fundamentale Form eines Varianzspektrums (Transformation einer Zeitfunktion bzw. Zeitreihe in eine spektrale Darstellung).

**Prewhitening:** „Vorglätten“ der zu analysierenden Zeitreihe, ggf. Anwendung von Filtertechniken.

**Proxy-Daten:** „Stellvertreter“-Daten. Interpretation von Datenreihen (z. B. aus Eisbohrkernen) als indirekte Anzeiger des → (Paläo-) Klimas, bspw. das → Sauerstoffisotopenverhältnis.

**Resediment:** Sediment, das durch Aufarbeitung vorhandener Sedimente (z. B. durch Rutschung) und deren erneute Ablagerung ggf. mit weiteren zusätzlichen (neuen) Bestandteilen gebildet worden ist. Bei einem Resediment kann von einer raschen Sedimentation ausgegangen werden (Resedimentationsereignis).

**Sauerstoffisotopenverhältnis:** Verhältnis von schweren zu leichten Isotopen in Relation zu einem internationalen Standard,  $\delta^{18}\text{O} = (((^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{Probe}} / (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{Standard}}) - 1) \times 1000$  ‰; in Eiskernen werden höhere  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte als im Verhältnis wärmer, niedrigere  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte als im Verhältnis kälter interpretiert.

**SPECMAP:** Spectral Mapping (Projekt), in den 1980er-Jahren entwickelte Standardchronologie/-zeitskala für den Sauerstoffisotopenbericht mariner Sedimente. Die Kompositkurve ist radiometrisch geeicht, geglättet, gefiltert und auf astronomische Zyklen getunt (eingephasst). Weiterentwicklung vgl. MIS.

**Stratigraphie:** Geologische Disziplin, die die Gesteine (primär Sedimentgesteine) nach ihrer zeitlichen Bildungsfolge ordnet (und korreliert) und eine Zeitskala zur Datierung der (geologischen) Ereignisse aufstellt. Die Subdisziplinen fokussieren auf bestimmte Merkmale oder Inhalte der Gesteine, die teilweise einem interpretativen Konzept unterliegen: u. a. **Lithostratigraphie** (Gestein); **Biostratigraphie** (Fossilien); **Chemostratigraphie** (Element- und Spurenstoffkonzentrationen); **Magnetostratigraphie** (Magnetisierung); **Sequenzstratigraphie** (seismische/sedimentologisch definierte Sequenzen); **Zyklostratigraphie** (siehe Abschnitt 2.2).

**Termination:** Abrupter Wechsel (abrupt shift) von niedrigen zu hohen Isotopenwerten (→ Sauerstoffisotopenverhältnis); werden als Wechsel von glazialen (kalten) zu interglazialen (warmen) Episoden interpretiert; nomenklatorisch durchnummeriert mit geraden x.0-Werten (→ Marine Isotopenstufen).

**Terrestrisch:** Das Land betreffend; bezieht sich auf Prozesse, Kräfte und Bildungen, die auf dem Festland auftreten.

**Turbidit:** Ein aus einem turbulent fließenden Trübe- oder Suspensionsstrom (turbidity current) gebildetes Sediment(gestein); die Sedimentkonzentration des Stroms beträgt 1-23 Volumenprozent. Es handelt sich um ein rasches Sedimentationsereignis.

**Varianz-Spektrum:** Auch Leistungs-, Energie- oder Powerspektrum; spektrale Darstellung (einer Zeitreihe): relative Varianz (Ordinate) und Frequenz (Abszisse).

**Zeitangaben:** Einfügungen in eckigen Klammern dienen – unter Inkaufnahme einer Verschlechterung der Lesbarkeit – zur Konkretisierung oder Klarstellung; die Einfügung *astronomisch* bezieht sich auf Jahreszahlen des astronomischen Modells (theoretische Rückrechnung), die Einfügung *radiometrisch* auf radiometrische Altersbestimmungen (inklusive Interpolation) und die Einfügung *Warven* auf eine Jahresschichtenzählung.

Präfixe: **k** (auch **K**) = Kilo (Tausend,  $10^3$ ), **M** (auch **m**) = Mega (Million,  $10^6$ ), **G** = Giga (Milliarde,  $10^9$ ).

Weitere Abkürzungen: **Mio.** = Million; **rad./radiom.** = radiometrisch.

Einschübe (abgekürzt) in eckiger Klammer: **[a]** = astronomisch, **[r]** = radiometrisch, **[W]** = Warven.

Jahr: **a** = annum; **y, Y, yr** = year.

Beispiele: **ka** = 1.000 Jahre; **21 k[a]a** = 21.000 [astronomische] Jahre; **1 M[a/r]a** = 1 Million [astronomische/radiometrische] Jahre; **5,2 Ma** = 5,2 Millionen Jahre (bei Zeitangaben in einem Zitat werden i. d. R. kein Einschübe in eckiger Klammer vorgenommen).

Kurzschreibweise für Zyklen: **100-k[a]a-Zyklus**, **100-ka-Zyklus** (Zitat).

## 11 Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 1</b>	Lokation und Beschreibung der fünf Bohrkerne des SPECMAP-Projektes. ....	10
<b>Tab. 2</b>	Wechselfolgen in der Benton- und Niobrara-Gruppe, Colorado (USA). ....	20
<b>Tab. 3</b>	Typen und Dicken der „Warven“ der Green-River-Formation.....	23
<b>Tab. 4</b>	Primär „Warven“-kalibrierte Schätzung der Dauer des Eozäns. ....	24
<b>Tab. 5</b>	Sedimentfolgen, die einen Präzessions-Zyklus andeuten (Green-River-Formation)...	25
<b>Tab. 6</b>	Zahlen und Fakten zu den Bohrkerne der „Pacemaker“-Studie. ....	27
<b>Tab. 7</b>	Konstruktion der SIMPLEX-Chronologien und -Zeitreihen (Kerne RC11-120, E49-18)..	28
<b>Tab. 8</b>	Spektrale Analyse der SIMPLEX- und ELBOW-Zeitreihen (Kerne RC11-120, E49-18)..	31
<b>Tab. 9</b>	Spektrale Analyse ausgewählter Rohdatenreihen (Kerne RC11-120, E49-18). ....	31
<b>Tab. 10</b>	Die Problematik 9.500 „Jahre“ zu verteilen (Grevenstein-F., Bergisches Land). ....	42
<b>Tab. 11</b>	Zeitkalibrierung des Pliozäns.....	49
<b>Tab. 12</b>	Kennzahlen zur Wostok-Eiskernbohrung (Antarktis). ....	54
<b>Tab. 13</b>	Ergebnisse der Spektralanalyse der getunten Wostok-Zeitreihen. ....	57
<b>Tab. 14</b>	Normierung der Verhältniszahlen der theoretischen Milankovitch-Zyklen. ....	62
<b>Tab. 15</b>	Intensität der Varianz unterkretazischer Sediment-Zyklen (NW-Deutschland). ....	62
<b>Tab. 16</b>	Ergebnisse der Spektralanalyse der MS- und GR-Zeitreihen (Messeler Ölschiefer)..	66
<b>Tab. 17</b>	Spektrale Analyse der $\delta^{13}\text{C}$ -Zeitreihe (Gotzikas-Profil, Griechenland).....	73
<b>Tab. 18</b>	Vergleich spektraler Analysen des Gotzika-Profiles (Griechenland).....	75
<b>Tab. 19</b>	Das Paläozän in ausgewählten Tiefseebohrungen.....	78
<b>Tab. 20</b>	Paläozäne Tiefseesedimente und ihre zyκλοstratigraphische Interpretation. ....	79
<b>Tab. 21</b>	Spektrale Analyse neogener Sedimentfolgen (Ptolemais-Becken, Griechenland). ...	84
<b>Tab. 22</b>	Sedimentationsraten und Zyklenmodell (Ptolemais-Becken, Griechenland).....	85
<b>Tab. 23</b>	Palynomorphen-Cluster und zyκλοstratigraphische Interpretation (Messel). ....	89
<b>Tab. 24</b>	Zyκλοstratigraphische Konstruktion (Meishan, Shangsi; China).....	98
<b>Tab. 25</b>	Vergleich der Spektralanalysen der MS-Datenreihen (Sancerre-Couy).....	103

## 12 Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1</b>	MILANKOVITCHS Kurven der sommerlichen Bestrahlung, 75°/45° nördliche Breite. ....	4
<b>Abb. 2</b>	MILANKOVITCHS Kurve der sommerlichen Bestrahlung, 65° nördliche Breite. ....	4
<b>Abb. 3</b>	SPECMAP-Zeitreihe (oberes Pleistozän). ....	12
<b>Abb. 4</b>	Lomb-Periodogramme der SPECMAP-Zeitreihe. ....	13
<b>Abb. 5</b>	Wavelet-Darstellung der SPECMAP-Zeitreihe. ....	14
<b>Abb. 6</b>	Sedimentationsraten (Kern RC11-120). ....	14
<b>Abb. 7</b>	Lomb-Periodogramme der $\delta^{18}\text{O}$ -Wertereien (Kern V22-174, RC11-120). ....	15
<b>Abb. 8</b>	LR04-Zeitreihe (Plio-Pleistozän). ....	18
<b>Abb. 9</b>	Lomb-Periodogramme der LR04-Zeitreihe. ....	18
<b>Abb. 10</b>	Rohdatenreihen $\delta^{18}\text{O}$ , Ts und <i>C. davisiana</i> (Kern RC11-120). ....	32
<b>Abb. 11</b>	Lomb-Periodogramme der Reihen $\delta^{18}\text{O}$ , Ts und <i>C. davisiana</i> (Kern RC11-120). ....	34
<b>Abb. 12</b>	CaCO <sub>3</sub> -Rohdatenreihe (Kern E49-18). ....	35
<b>Abb. 13</b>	Lomb-Periodogramme der CaCO <sub>3</sub> -Wertereien (Kern E49-18). ....	35
<b>Abb. 14</b>	Wertereien mit ausgewählten, isolierten Perioden (Kern RC11-120). ....	37
<b>Abb. 15</b>	$\delta^{13}\text{C}$ - und CaCO <sub>3</sub> -Rohdatenreihe (Kern RC11-120). ....	38
<b>Abb. 16</b>	Lomb-Periodogramme der $\delta^{13}\text{C}$ - und CaCO <sub>3</sub> -Reihe (Kern RC11-120). ....	39
<b>Abb. 17</b>	Karbonatische Wechselfolge am Punta di Maiata (Sizilien). ....	46
<b>Abb. 18</b>	Karbonatische Wechselfolge, Steilküste Eraclea Minoa (Sizilien). ....	47
<b>Abb. 19</b>	Spektrale Analyse der $\delta^{18}\text{O}$ -Reihen des Rossello-Kompositprofils (Sizilien). ....	52
<b>Abb. 20</b>	Spektrale Analyse der SST-Reihen des Rossello-Kompositprofils (Sizilien). ....	53
<b>Abb. 21</b>	Datierung des Wostok-Eiskerns. ....	56
<b>Abb. 22</b>	Variansspektrum der getunten Wostok- $\delta\text{D}$ -Zeitreihe. ....	57
<b>Abb. 23</b>	Getunte Wostok- $\delta^{18}\text{O}$ -Zeitreihe. ....	58
<b>Abb. 24</b>	Theoretische Insolation für 65° N (Monatsmitte Juli). ....	58
<b>Abb. 25</b>	Variansspektren der $\delta^{18}\text{O}$ -Zeitreihe (Wostok) und Insulationskurve (65° N). ....	59
<b>Abb. 26</b>	$\delta^{13}\text{C}$ -Wertereien (Viglia Shale Member, Gotzikas-Profil, Griechenland). ....	72
<b>Abb. 27</b>	Lomb-Periodogramme der $\delta^{13}\text{C}$ -Reihen (Gotzikas-Profil). ....	74
<b>Abb. 28</b>	Sedimentfolge an der Steilküste von Zumaia, Nordspanien (1). ....	76
<b>Abb. 29</b>	Sedimentfolge an der Steilküste von Zumaia, Nordspanien (2). ....	77
<b>Abb. 30</b>	Relativer Anteil von <i>Plicatopollis spp.</i> im Messeler Ölschiefer, FB 2001. ....	90
<b>Abb. 31</b>	Wavelet-Darstellung des relativen Anteils von <i>Plicatopollis spp.</i> ....	91
<b>Abb. 32</b>	Lomb-Periodogramme des relativen Anteils von <i>Plicatopollis spp.</i> ....	91
<b>Abb. 33</b>	Redfit-Darstellungen des relativen Anteils von <i>Plicatopollis spp.</i> ....	92
<b>Abb. 34</b>	Relativer Anteil der Spezies des Cluster 7 im Messeler Ölschiefer. ....	93
<b>Abb. 35</b>	Lomb-Periodogramme des Cluster 7. ....	93
<b>Abb. 36</b>	Wavelet-Darstellung des Cluster 7. ....	94
<b>Abb. 37</b>	MS-Wertereien, Kernbohrung Sancerre-Couy (Frankreich). ....	101
<b>Abb. 38</b>	Lomb-Periodogramme der MS-Rohdaten (Sancerre-Couy). ....	104
<b>Abb. 39</b>	$\delta^{18}\text{O}$ -Reihe mit einfacher sinusoidaler Passung (Kern RC11-120). ....	112
<b>Abb. 40</b>	$\delta^{18}\text{O}$ -Reihe mit vierfacher sinusoidaler Passung (Kern RC11-120). ....	112

## 13 Bildnachweis

Bildnachweis wie im Einzelnen ausgewiesen; darüber hinaus:

<b>Abbildung</b>	<b>Quelle Wikimedia</b>
<b>Abb. 18</b>	"Capo Bianco-Eraclea Minoa (4)" by Hein56didden - Own work. Licensed under CC BY-SA 4.0 via Wikimedia Commons

## 14 Datennachweis

Die Zugriffe erfolgten im Zeitraum Oktober bis Dezember 2014.

<b>Datei (Autor)</b>	<b>Quelle</b>
Bassinot_stack_d18O (BASSINOT et al. 1994)	<a href="http://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.715006">http://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.715006</a>
deutnat.txt (PETIT et al. 1999)	<a href="http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/antarctica/vostok/">http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/antarctica/vostok/</a>
e49-18-r-tab.txt (RUDDIMAN 1992)	<a href="http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/carbonate.html">http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/carbonate.html</a>
LR04stack.txt (Lisiecki & Raymo 2005)	<a href="http://www.lorraine-lisiecki.com/LR04stack.txt">www.lorraine-lisiecki.com/LR04stack.txt</a> ; auch unter: <a href="ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/contributions_by_author/lisiecki2005/lisiecki2005.txt">ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/contributions_by_author/lisiecki2005/lisiecki2005.txt</a>
mediasect-tab.txt (LOURENS et al. 1996)	<a href="ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/paleocean/sediment_files/complete/medisect-tab.txt">ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/paleocean/sediment_files/complete/medisect-tab.txt</a>
ORBIT91 (BERGER & LOUTRE 1991)	<a href="http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/insolation/orbit91">http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/insolation/orbit91</a>
o18nat.txt (PETIT et al. 1999)	<a href="http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/antarctica/vostok/">http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/antarctica/vostok/</a>
Boulila-et-al_2013 (2).tab (BOULILA et al. 2014)	<a href="http://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.821258">http://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.821258</a>
rc11120i.stretch	<a href="http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/paleocean/specmap/specmap2/">www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/paleocean/specmap/specmap2/</a>
rc11-120_isot-tab.txt (IMBRIE et al. 1984, HAYS et al. 1976)	<a href="http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/paleocean/sediment_files/isotope/rc11-120_isot-tab.txt">http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/paleocean/sediment_files/isotope/rc11-120_isot-tab.txt</a>
RC11-120_stab_iso_SST (MARTINSON et al. 1987)	<a href="http://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.51706">http://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.51706</a>
specmap.006 specmap.017	<a href="http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/paleocean/specmap/specmap1/">http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/paleocean/specmap/specmap1/</a> <a href="http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/geology/specmap.html">www.ngdc.noaa.gov/mgg/geology/specmap.html</a>

**Datei (Autor)****Quelle**

specmap.051  
(IMBRIE et al. 1984)

[www.ngdc.noaa.gov/mgg/geology/data/specmap/](http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/geology/data/specmap/)

NGDC: National Geophysical Data Center (USA); NCDC: National Climatic Data Center (USA); NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration (USA); PANGAEA: Offene Bibliothek, Hosting durch AWI/MARUM.

## 15 Dank

Für eine Durchsicht des Manuskripts und wertvolle Hinweise danke ich Dr. Martin Ernst und Thomas Veigel, für zahlreiche Vorschläge zur Verbesserung der Verständlichkeit Dr. Reinhard Junker. Øyvind Hammer danke ich für die Zurverfügungstellung des Software-Pakets PAST.

## 16 Literatur

- ADHÉMAR J (1842) Révolution des Mers: Déluges Périodiques. Publication privée, Paris.
- ALEGO TJ & WILKINSON BH (1988) Periodicity of mesoscale Phanerozoic sedimentary cycles and the role of Milankovitch orbital modulation. *Journal of Geology* 96, 313-322.
- ANTEVS E (1925) Retreat of the last ice sheet in eastern Canada. *Geol. Survey Canada Mem.* 146.
- AQUIRRE E & PASINI G (1985) The Pliocene-Pleistocene boundary. *Episodes* 8, 116-120.
- AUBRY MP, OUDA K, DUPUIS C, BERGGREN WA, VAN COUVERING JA & the Members of the Working Group of the Paleocene/Eocene Boundary (2007) The Global Boundary Stratotype-section and Point (GSSP) for the base of the Eocene Series in the Dababiya section (Egypt). *Episodes* 30, 271-286.
- BARD E, HAMELIN B & FAIRBANKS RG (1990) U-Th ages obtained by mass spectrometry in corals from Barbados: Sea level during the past 130,000 years. *Nature* 346, 456-458.
- BARRELL J (1917) Rhythms and the measurement of geologic time. *Bull. Geol. Soc. Am.* 28, 745-904.
- BAKSI A, HOUGHTON B, MCWILLIAMS M, TANAKA H & TURNER G (1991) What is the age of the Brunhes/Matuyama polarity transition? *EOS Trans. Am. Geophys. Union* 72, 135.
- BAKSI A, HSU V, MCWILLIAMS M & FARRAR E (1992)  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of the Brunhes/Matuyama geomagnetic field reversal. *Science* 256, 356-357.
- BASSINOT FC, LABEYRIE LD, VINCENT E, QUIDELLEUR X, SHACKLETON NJ & LANCELOT Y (1994) The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal. *Earth Planet. Sci. Lett.* 126, 91-108.
- BEERBOWER JR (1964) Cyclothem and cyclic depositional mechanisms in alluvial plain sedimentation. In: MERRIAM DF (Ed.) *Symposium on cyclic sedimentation. Kansas Geological Survey* 169; 31-42.
- BENNETT KD (2005) Documentation for psimpoll 4.25 and pscomb 1.03. C programs for plotting pollen diagrams and analyzing pollen data. Uppsala University.
- BERGER A (1988) Milankovitch Theory and Climate. *Reviews of Geophysics* 26, 624-657.
- BERGER A, LOUTRE MF & DEHANT V (1989) Influence of the changing lunar orbit on the astronomical frequencies of pre-quaternary insolation patterns. *Palaeoceanography* 4, 555-564.
- BERGER A & LOUTRE MF (1991) Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Sciences Review* 10, 297-317.
- BERGER A, LOUTRE MF & LASKAR J (1992) Stability of the astronomical frequencies over the Earth's history for paleoclimate studies. *Science* 255, 560-566.
- BERGER A & LOUTRE MF (1994) Precession, Eccentricity, Obliquity, Insolation and Paleoclimates. In: DEPLESSY JC & SPYRIDAKIS M-T (Eds.) *Long-Term Climatic Variations. Data and Modelling. NATO ASI Series I, Vol. 22*, 107-141.

- BERGER WH, BICKERT T, SCHMIDT H & WEFER G (1993) Quaternary oxygen isotope record of pelagic foraminifers: Site 908, Ontong Java Plateau. In: Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 130. Ocean Drilling Program, College Station, TX, 381-395.
- BERGER WH, BICKERT T, WEFER G & YASUDA MK (1995) Brunhes-Matuyama boundary: 790 k.y. data consistent with ODP Leg 130 oxygen isotope records based on fit to Milankovitch template. *Geophysical Research Letters* 22, 1525-1528.
- BERGER WH (2012) Milankovitch Theory – Hits and Misses. Scripps Institution of Oceanography Technical Report, San Diego.
- BERGGREN WA, KENT DV & VAN COUVERING JA (1985) The Neogene: Part 2 Neogene geochronology and chronostratigraphy. Geological Society, London, *Memoirs* 10, 211-260.
- BLACKMAN RB & TUKEY JW (1958) *The Measurement of Power Spectra*. New York.
- BOULILA S, GALBRUN B, MILLER KG, PEKAR SF, BROWNING JV, LASKAR J & WRIGHT JD (2011) On the origin of Cenozoic and Mesozoic “third-order” eustatic sequences. *Earth-Sci. Rev.* 109, 94-112.
- BOULILA S, GALBRUN B, HURET E, HINNOV LA, ROUGET I, GARDIN S. & BARTOLINI A (2014) Astronomical calibration of the Toarcian Stage: Implications for sequence stratigraphy and duration of the early Toarcian OAE. *Earth Planet. Sci. Lett.* 386, 98-111.
- BRADLEY WH (1929) The varves and climate of the Green River Epoch. U. S. Geological Survey Professional Paper 158-E, 87-100.
- BROECKER WS (1966) Absolute Dating and the Astronomical Theory of Glaciation. *Science* 151, 399-304.
- BROECKER WS, THURBER DL, GODDARD J, KU T-L, MATTHEWS RK & MESOLETTA J (1968) Milankovitch Hypothesis Supported by Precise Dating of Coral Reefs and Deep-Sea Sediments. *Science* 159, 297-300.
- BROECKER WS & VAN DONK J (1970) Insolation changes, ice volumes, and the O18 record in deep sea cores. *Rev. Geophys. Space Phys.* 8, 169-198.
- CASTRADORI D, RIO D, HILGEN FJ & LOURENS LJ (1998) The Global Standard Stratotype-section and Point (GSSP) of the Piacenzian Stage (Middle Pliocene). *Episodes* 21, 88-93.
- CHAPPELL J (1973) Astronomical Theory of Climatic Change: Status and Problem. *Quaternary Research* 3, 221-236.
- CLEVELAND WS (1979) Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *J. Am. Stat. Assoc.* 74, 829-836.
- COZZI A, HINNOV LA & HARDIE LA (2005) Orbitally forced Lofer cycles in the Dachstein Limestone of the Julian Alps (NE Italy). *Geology* 33, 789-792.
- CROLL J (1864) On the physical cause of the change of the climate during geological epochs. *Philosophical Magazine* 28, 121-137.
- CROLL J (1875) *Climate and Time in Their Geological Relations*. New York.
- DE BOER PL (1982) Cyclicity and the storage of organic matter in Middle Cretaceous pelagic sediments. In: EINSELE G & SEILACHER A (Eds.) *Cyclic and event stratification*. Berlin, Heidelberg, New York, S. 456-475.
- DE GEER G (1912) A geochronology of the last 12,000 years. *Cong. Géol. Internat. Compte rendu, Stockholm, 1910*, 241-253.
- DE VISSER JP, EBBING JHJ, GUDJONSSON L, HILGEN FJ, JORISSEN FJ, VERHALLEN PJJM & ZEVENBOOM D (1989) The Origin of Rhythmic Bedding in the Pliocene Trubi Formation of Silicy, Southern Italy. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 69, 45-66.
- DINARÈS-TURELL J, BACETA JI, PUJALTE V, ORUE-ETXEBARRIA X, BERNAOLA G & LORITO S (2003) Untangling the Paleocene climatic rhythm: an astronomically calibrated Early Paleocene magnetostratigraphy and biostratigraphy at Zumaia (Basque basin, northern Spain). *Earth and Planetary Science Letters* 216, 483-500.
- DOTT RH (1982) 1982 SEPM Presidential Address: Episodic Sedimentation – How normal is average? How rare is rare? Does it matter? *Journal of Sedimentary Petrology* 53, 5-23.
- DUFF PMCLD, HALLAM A & WALTON EK (1967) *Cyclic sedimentation*. Amsterdam.
- DYNI JR (2006) *Geology and Resources of Some World Oil-Shale Deposits*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5294.
- EINSELE G, RICKEN W & SEILACHER A (1991) Cycles and Events in Stratigraphy – Basic Concepts and terms. In: EINSELE G, RICKEN W & SEILACHER A (Eds.) *Cycles and Events in Stratigraphy*. Berlin Heidelberg, 1-22.

- EL BAY R, JACOBY W & WALLNER H (2001) Milankovitch Signals in Messel "Oilshales". *Kaupia* 11, 69-72.
- ENOS P & SAMANKASSOU E (1998) Lofer cyclothems revisited (Late Triassic, Northern Alps, Austria). *Facies* 38, 207-228.
- FELDER M & HARMS FJ (2004) Lithologie und genetische Interpretation der vulkano-sedimentären Ablagerungen aus der Grube Messel anhand der Forschungsbohrung Messel 2001 und weiterer Bohrungen (Eozän, Messel-Formation, Sprendlinger Horst, Südhessen). *Cour For Senckenbg* 252, 151-206.
- FISCHER AG (1964) The Lofer cyclothems of the Alpine Triassic. In: MERRIAM DF (Ed.) Symposium on cyclic sedimentation. *Kansas Geological Survey Bulletin* 169, 107-149.
- FISCHER AG, D'ARGENIO B, PREMOLI SILA I, WEISSERT H & FERRERI V (2004) Cyclostratigraphic approach to Earth's history: An Introduction. In: D'ARGENIO B, FISCHER AG, PREMOLI SILA I, WEISSERT H & FERRERI V (Eds.) Cyclostratigraphy: Approaches and case histories. *Tulsa*, 5-13.
- FLÜGEL E (1978) Mikrofazielle Untersuchungsmethoden von Kalken. Berlin, Heidelberg, New York.
- FUCHS S (1992) The Professional Quest for Truth: A Social Theory of Science and Knowledge. Albany, NY.
- GARCIA-CASTELLANOS D, ESTRADA F, JIMÉNEZ-MUNT I, GORINI C, FERNÁNDEZ M, VERGÉS J & DE VICENTE R (2009) Catastrophic flood of the Mediterranean after the Messinian salinity crisis. *Nature* 462, 778-782.
- GALEOTTI S, SPROVIERI M, COCCIONI R, BELLANCA A & NERI R (2003) Orbitally modulated black shale deposition in the upper Albian Amadeus Segment (central Italy): a multi-proxy reconstruction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 190, 441-458.
- GELUK MC & RÖHLING HG (1997) High-resolution sequence stratigraphy of the Lower Triassic "Buntsandstein" in the Netherlands and northwestern Germany. *Geol. Mijnb.* 76, 227-246.
- GHIL M, ALLEN RM, DETTINGER MD, IDE K, KONDRASHOV D, MANN ME, ROBERTSON A, SAUNDERS A, TIAN Y, VARADI F & YIOU P (2002) Advanced spectral methods for climatic time series. *Rev. Geophys.* 40, 1.1-1.41.
- GILBERT GK (1895) Sedimentary measurement of geological time. *Journal of Geology* 3, 121-127.
- GLENN CR & KELTS K (1991) Sedimentary Rhythms in Lake Deposits. In: EINSELE G, RICKEN W & SEILACHER A (Eds.) *Cycles and Events in Stratigraphy*. Berlin Heidelberg, 188-221.
- GOTH K (1990) Der Messeler Ölschiefer – ein Algenlaminit. *Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg* 131, 1–143.
- GRADSTEIN FM (2004) Introduction. In: GRADSTEIN FM, OGG JG & SMITH AG (Eds.) *A Geologic Time Scale 2004*. Cambridge, 3-19.
- GRADSTEIN FM (2012) Introduction. In: GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (Eds.) *A Geologic Time Scale 2012*. Volume 1/2, Oxford Amsterdam, 1-29.
- GRADSTEIN FM, ACHTERBERG FP, OGG JG, HARDENBOL J, VAN VEEN P, THIERRY J & HUANG Z (1994) A Mesozoic time scale. *J. Geophys. Res.* 99, 24,051-24,074.
- GRADSTEIN FM, OGG JG & SMITH AG (Eds.) (2004) *A Geologic Time Scale 2004*. Cambridge.
- GRADSTEIN FM & OGG JG (2012) The Chronostratigraphic Scale. In: GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (Eds.) *The Geologic Time Scale 2012*. Volume 1/2, Oxford Amsterdam, 31-42.
- GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (Eds.) (2012) *The Geologic Time Scale 2012*. Volume 1/2, Oxford Amsterdam.
- HAMMER Ø (2010) *Time series analysis with Past*. University of Oslo.
- HAMMER Ø (2012) *Past. Paleontological Statistics, Version 2.17. Reference Manual*. University of Oslo.
- HARLAND WB, ARMSTRONG RL, COX AV, CRAIG LE, SMITH AG & SMITH DG (1989) *A geological time scale 1989*. Cambridge.
- HAYS JD, IMBRIE J & SHACKLETON NJ (1976). Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science* 194, 1121-1132.
- HERING G (1995) Milankovitch-Zyklen in mitteldevonischen Schelf-Carbonaten des Rheinischen Schiefergebirges. *Göttinger Arb. Geol. Paläont.* 65, 1-63.
- HILGEN FJ (1987) Sedimentary rhythms and high-resolution chronostratigraphic correlations in the Mediterranean Pliocene. *Newsletters in Stratigraphy* 17, 109-127.
- HILGEN FJ (1991a) Astronomical calibration of Gauss to Matuyama sapropels in the Mediterranean and implication for the Geomagnetic Polarity Time Scale. *Earth and Planetary Science Letters* 104, 226-244.
- HILGEN FJ (1991b) Extension of the astronomically calibrated (polarity) time scale to the Miocene/Pliocene boundary. *Earth and Planetary Science Letters* 107, 349-368.

- HILGEN FJ (1994). An astronomically calibrated (polarity) time scale for the Pliocene-Pleistocene: a brief review. *Spec. Publ. Int. Assoc. Sediment.* 19, 109-116.
- HILGEN FJ & LANGEREIS CG (1988) The age of the Miocene-Pliocene boundary in the Capo Rossello area (Sicily). *Earth and Planetary Science Letters* 91, 214-222.
- HILGEN FJ & LANGEREIS CG (1989) Periodicities of CaCO<sub>3</sub> cycles in the Pliocene of Sicily: discrepancies with the quasi-periods of the Earth's orbital cycles? *Terra Nova* 1, 409-415.
- HILGEN FJ & LANGEREIS CG (1993) A critical evaluation of the Miocene/Pliocene boundary as defined in the Mediterranean. *Earth and Planetary Science Letters* 118, 167-179.
- HILGEN FJ, KUIPER KF & LOURENS LJ (2010) Evaluation of the astronomical time scale for the Paleocene and earliest Eocene. *Earth and Planetary Science Letters* 300, 139-151.
- HILGEN FJ, LOURENS LJ & VAN DAM with contributions by BEU AG, BOYES AF, COOPER RA, KRIJGSMAN W, OGG JG, PILLER WE & WILSON DS (2012) The Neogene Period. In: GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (Eds.) *The Geologic Time Scale 2012. Volume 1/2*, Oxford Amsterdam, 923-978.
- HILGEN FJ, HINNOV LA, ABDULA AZIZ H, ABELS HA, BEATENBURG S, BOSMANS JHC, DE BOER B, HÜSING SK, KUIPER KF, LOURENS LJ, RIVERA T, TUENTNER E, VAN DE WAL RSW, WOTZLAW J-F & ZEEDEN C (2014) Stratigraphic continuity and fragmentary sedimentation: the success of cyclostratigraphy as part of integrated stratigraphy. In: SMITH DG, BAILEY RJ, BURGESS PM & FRASER AJ (Eds.) *Strata and Time: Probing the Gaps in Our Understanding*. Geological Society, London, Special Publication 404; doi: 10.1144/SP404.12.
- HINNOV LA & PARK JJ (1999) Strategies for assessing Early-Middle (Pliensbachian–Aalenian) Jurassic cyclochronologies. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A* 357, 1831-1859.
- HINNOV LA & OGG JG (2007) Cyclostratigraphy and the Astronomical Time Scale. *Stratigraphy* 4, 239-251.
- HINNOV LA & HILGEN FJ (2012) Cyclostratigraphy and Astrochronology. In: GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (Eds.) *The Geologic Time Scale 2012. Volume 1/2*, Oxford Amsterdam, 63-83.
- HOLMES A (1927) *The Age of the earth*. London.
- HOUSE MR & GALE AS (1995) Orbital forcing timescales: an introduction. In: HOUSE MR & GALE AS (Eds.) *Orbital forcing timescales and cyclostratigraphy*. Geological Society, London, Special Publication 85, 1-18.
- HOWELL PJ (1995) *Arand Software*. Providence, USA.
- IMBRIE J & KIPP NG (1971) A new micropaleontological method for quantitative paleoclimatology. In: TUREKIAN KK (Ed.) *Late Cenozoic Glacial Ages*. New Haven, 71-182.
- IMBRIE J, HAYS J, MARTINSON D, MCINTYRE A, MIX A, MORLEY J, PISIAS N, PRELL W & SHACKLETON N (1984) The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology of the marine  $\delta^{18}\text{O}$  record. In: BERGER A, IMBRIE J, HAYS J, KUKLA G & SALTZMAN B (Eds.) *Milankovitch and Climate*. NATO ASI Series C, Vol. 126 Part 1/2, 269-305.
- IMBRIE J & IMBRIE KP (1979) *Ice Ages, Solving the Mystery*. Hillside, NJ.
- IMBRIE J & IMBRIE KP (1981) *Die Eiszeiten. Naturgewalten verändern unsere Welt*. Düsseldorf Wien.
- JIN YG, WANG Y, HENDERSON CM, WARDLAW BR, SHEN SZ & CAO CQ (2006) The Global Stratotype Section and Point (GSSP) for the base of the Changhsingian stage (Upper Permian). *Episodes* 29, 175-182.
- JOHNSON RG (1982) Brunhes-Matuyama magnetic reversal dated 790,000 yr B.P. by marine-astronomical correlations. *Quat. Res.* 17, 145-147.
- JOURDAN F, MARK DF & VERATI C (2014) Advances in  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating: from archaeology to planetary sciences – introduction. In: JOURDAN F, MARK DF & VERATI C (Eds.) *Advances in  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating: from archaeology to planetary sciences*, 1-8, doi: 10.1144/SP378.24.
- JOUZEL J, WAELBROECK C, MALAIZE B, BENDER M, PETIT JR, STIEVENARD M, BARKOV NI, BARNOLA JM, KING T, KOTLYAKOV VM, LIPENKOV V, LORIUS C., RAYNAUD D, RITZ C & SOWERS T (1996) Climatic Interpretations of the recently extended Vostok ice records. *Climate Dynamics* 12, 513-521.
- KARAKITSIOS V & AGIADI-KATSIAOUNI K (2007) Regional Correlation and Cyclostratigraphy in the Mid-Cretaceous Formations of the Ionian Zone. *Bulletin Geol. Soc. Greece* 40/1, 85-100.
- KEMP WC & EGER DT (1967) The relationship among sequences with applications to geological data. *J. Geophys. Res.* 72, 739-751.
- KÖPPEN W & WEGENER A (1924) *Die Klimate der geologischen Vorzeit*. Berlin.

- KOTULLA M (2013) Grönländische Eiskerndaten und ihre Interpretation: Absolute Datierung durch Zählung von Jahresschichten? W+W Special Paper G-13-1, Bayersbronn; <http://www.wort-und-wissen.de/download.html>.
- KOTULLA M (2014a) Gültigkeit und Grenzen geologischer Zeitbestimmung. Online-Loseblattsammlung, Stand: 1. Ergänzungslieferung 03/2014, <http://www.wort-und-wissen.de/loseblattsammlung.html>.
- KOTULLA M (2014b) Megafluten. *Studium Integrale Journal* 21, 4-11.
- KOZUR HW & BACHMANN GH (2005) Correlation of the Germanic Triassic with the international scale. *Albertiana* 32, 21-35.
- KUKLA GJ (1972) Insolation and glacial. *Boreas* 1, 63-96.
- KUKLA GJ (1975) Missing link between Milankovitch and climate. *Nature* 253, 600-603.
- LAMBERT A & HSÜ KJ (1979) Non-annual cycles of varve-like sedimentation in Walensee, Switzerland. *Sedimentology* 26, 453-461.
- LANGEREIS CG & HILGEN FJ (1991) The Rossello composite: a Mediterranean and global reference section for the Early to early Late Pliocene. *Earth and Planetary Science Letters* 104, 211-225.
- LASKAR J (1988) Secular evolution of the solar system over 10 million years. *Astronomy and Astrophysics* 198, 341-362.
- LASKAR J (1990) The chaotic motion of the solar system: A numerical estimate of the size of the chaotic zones. *Icarus* 88, 266-291.
- LASKAR J (1999) The limits of Earth orbital calculations for geological time-scale use. *Phil. Trans. R. Soc. London A* 357, 1735-1759.
- LASKAR J, JOUTEL F & BOUDIN F (1993) Orbital, precessional and insolation quantities for the Earth from -20 Myr to +10 Myr. *Astronomy and Astrophysics* 270, 522-533.
- LASKAR J, ROBUTEL P, JOUTEL J, GASTINEAU M, CORREIA ACM & LEVRAND B (2004) A numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astronomy and Astrophysics* 428, 261-285.
- LASKAR J, FIENGA A, GASTINEAU M & MANCHE H (2011) La2010: A new orbital solution for the long term motion of the Earth. *Astronomy and Astrophysics* 532, doi: 10.1051/0004-6361/201116836.
- LATOUR B (1987) *Science in Action: How to Follow Scientists and Engineers through Society*. Milton Keynes, UK.
- LATOUR B & WOOLGAR S (1986) *Laboratory Life: The Construction of Scientific Knowledge*. 2nd ed., Princeton, NJ.
- LENZ OK, WILDE V, RIEGEL W & HARMS FJ (2010) A 600 k.y. record of El Niño–Southern Oscillation (ENSO): Evidence for persisting teleconnections during the middle Eocene greenhouse climate of Central Europe. *Geology* 38, 627-630, doi: 10.1130/G30889.1.
- LENZ OK, WILDE V & RIEGEL W (2011) Short-term fluctuations in vegetation and phytoplankton during the Middle Eocene greenhouse climate: a 640-kyr record from the Messel oil shale (Germany). *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* 100, 1851-1874.
- LENZ OK, WILDE V, MERTZ DF & RIEGEL W (2014) New palynology-based astronomical and revised  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages for the Eocene maar lake of Messel (Germany). Short-term fluctuations in vegetation and phytoplankton during the Middle Eocene greenhouse climate: a 640-kyr record from the Messel oil shale (Germany). *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, doi: 10.1007/s00531-014-1126-2.
- LIEBIG V (2001) Neuaufnahme der Forschungsbohrungen KB 1, 2, 4, 5, und 7 von 1980 aus der Grube Messel (Sprendlinger Horst, Südhessen). *Kaupia* 11, 3-68.
- LISIECKI LE & LISIECKI PA (2002) Application of dynamic programming to the correlation of paleoclimate records, *Paleoceanography* 17, 1049, doi: 10.1029/2001PA000733.
- LISIECKI LE & RAYMO ME (2005) A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records, *Paleoceanography* 20, PA1003, doi: 10.1029/2004PA001071.
- LOMB NR (1976) Least squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophys. Space Sci.* 39, 447-462.
- LOURENS LJ, ANTONARAKOU A, HILGEN FJ, VAN HOOF AAM, VERGNAUD-GRAZZINI C & ZACHARIASSE W (1996) Evaluation of the Plio-Pleistocene astronomical timescale. *Paleoceanography* 11, 391-413.
- LYELL C (1867-68) *Principles of Geology*. 2 vols., 10th ed., London.
- MACHLUS ML, OLSEN PE, CHRISTIE-BLICK N & HEMMING SR (2008) Spectral analysis of the lower Eocene Wilkins Peak Member, Green River Formation, Wyoming: Support for Milankovitch cyclicity. *Earth Planet. Sci. Lett.* 268, 64-75.

- MALINVERNO A, ERBA E & HERBERT TD (2010) Orbital tuning as an inverse problem: Chronology of the early Aptian anoxic event 1 a (Selli Level) in the Cismon APTICORE. *Paleoceanography* 25 PA2203, doi: 10.1029/2009PA001769.
- MANN ME & LEES JM (1996) Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series. *Clim. Change* 33, 409–445.
- MARTINSON DG, PISIAS NG, HAYS JD, IMBRIE J, MOORE JR. TC & SHACKLETON (1987) Age Dating and the Orbital Theory of the Ice Ages: Development of a High-Resolution 0 to 300,000-Year Chronostratigraphy. *Quaternary Research* 27, 1-29.
- MENNING M, GAST R, HAGDORN H, KÄDING KC, SZURLIES M & NITSCH E (2005) Zeitskala für Perm und Trias in der stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002, zylostratigraphische Kalibrierung der höheren Dyas und Germanischen Trias und das Alter der Stufen Roadium bis Rhaetium 2005. *Newsl. Stratigr.* 41, 173-210.
- MENNING M & KÄDING K-C (2013) Magnetostratigraphie, Zylostratigraphie, geologische Zeitskala und Nomenklatur des Buntsandstein von Mitteleuropa. In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.; Koordination und Redaktion: J. LEPPER & H. G. RÖHLING für die Subkommission Perm-Trias) *Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein. Schr.-R. dt. Ges. Geowiss.* 69, 165-212; Hannover.
- MERTZ DF & RENNE PR (2005) A numerical age for the Messel fossil deposit (UNESCO World Heritage Site) derived from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating on a basaltic rock fragment. In: HARMS FJ & SCHAAL S (eds) *Current geological and paleontological research in the messel formation. Cour For Senckenbg* 255, 67-75.
- MESOLELLA KJ, MATTHEWS RK, BROEKER WS, & THURBER DL (1969) The astronomical theory of climate changes: Barbados data. *Jour. Geology* 77, 250-274.
- MEYERS SR (2008) Resolving Milankovitchian controversies: The Triassic Latemar Limestone and the Eocene Green River Formation. *Geology* 36, 319-322.
- MIALL AD & MIALL CE (2004) Empiricism and model-building in stratigraphy: Around the hermeneutic cycle in the pursuit of stratigraphic correlation. *Stratigraphy* 1, 27-46.
- MILANKOVITCH M (1920) Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire. *Acad. Yougoslave Sci. Arts, Zagreb.*
- MILANKOVITCH M (1930) Mathematische Klimalehre und astronomische Theorie der Klimaschwankungen. In: KÖPPEN W & GEIGER R (Eds.) *Handbuch der Klimatologie.* Berlin, 1-176.
- MILANKOVITCH M (1941) Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. Ed. Spec. *Acad. Royale Serbe, Belgrad.*
- MOLINA E, ALEGRET L, ARENILLAS I, ARZ JA, GALLALA N, HARDENBOHL J, VON SALIS K, STEURBAUT E, VANDENBERGHE N & ZAGHBIB-TÜRKI D (2006) The Global Boundary Stratotype Section and Point for the base of the Danian Stage (Paleocene, Paleogene, "Tertiary", Cenozoic) at El Kef, Tunisia – Original definition and revision. *Episodes* 29, 263-273.
- MULLER RA & MACDONALD GJ (2000) *Ice Ages and Astronomical Causes. Data, spectral analysis and mechanisms.* Berlin Heidelberg New York.
- NEBE DW (1999) *Zyklenuntersuchungen an unterkretazischen Sedimenten in NW-Deutschland – Nachweisbarkeit von Milankovich-Zyklen.* Diss., Bochum.
- NORMARK WR & REID JA (2003) Extensive Deposits on the Pacific Plate from Late Pleistocene North American Glacial Lake Outbursts. *Journal of Geology* 111, 617-637.
- OGG JG (2012) Triassic. In: GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (Eds.) *The Geologic Time Scale 2012. Volume 1/2, Oxford Amsterdam,* 681-730.
- OGG JG & HINNOV LA (2012) Cretaceous. In: GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (Eds.) *The Geologic Time Scale 2012. Volume 1/2, Oxford Amsterdam,* 793-853.
- PAILLARD D, LABEYRIE L & YIU P (1996) Macintosh program performs time-series analysis. *EOS* 77, 379.
- PENCK A & BRÜCKNER E (1901-09) *Die Alpen im Eiszeitalter.* 3 Bände, Leipzig.
- PETIT JR, JOUZEL J, RAYNAUD D, BARKOV NI, BARNOLA J-M, BASILE I, BENDER M, CHAPPELLAZ J, DEVIS M, DELAYGUE G, DELMOTTE M, KOTLYAKOV VM, LEGRAND M, LIPENKOV VY, LORIUS C, PEPIN L, RITZ C, SALTZMAN E & STIEVENARD M (1999) Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399, 429-436.

- QUINN TR, TREMAINE S & DUNCAN M (1991) A three million integration of the Earth's orbit. *Astron. J.* 101, 2287-2305.
- REINSCH T (2008) Evolutionary Spektral Analysis software package ESALAB. Unpubl., Universität Köln.
- RIO D, SPROVIERI R, CASTRADORI D & DI STEFANO E (1998) The Gelasian Stage (Upper Pliocene): a new unit of the Global Standard Chronostratigraphic Scale. *Episodes* 21, 82-87.
- ROBERTS DH, LÉHAR J & DREHER LW (1987) Time series analysis with CLEAN. I. Derivation of a spectrum. *Astron. J.* 93, 968-989.
- RUDDIMAN WF, RAYMO ME, MARTIJNSON DG, CLEMENT BM & BACKMAN J (1989) Pleistocene evolution: Northern hemisphere ice sheets and North Atlantic Ocean. *Palaeoceanography* 4, 353-412.
- RUDDIMAN W (1992) Calcium carbonate database. IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series #92-001. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder, Colorado, USA.
- SADLER PM (1981) Sediment accumulation rates and the completeness of stratigraphic sections. *Jour. Geology*, 89, 569-584.
- SCARGLE JD (1982) Studies in astronomical time series analysis II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Astrophysical Journal* 263, 835-853.
- SCARGLE JD (1989) Studies in astronomical time series analysis III. Fourier transforms, autocorrelation functions, and cross-correlation functions of unevenly spaced data. *The Astrophysical Journal* 343, 874-887.
- SCHAAF M (1995) Digital Sediment Color Analyses - Development and application to Holocene and late Pleistocene sediments from East Pacific DSDP/ODP Sites. Unveröff. Diss., Bochum.
- SCHAAF M & THUROW J (1994) A fast and easy method to derive highest-resolution time-series datasets from drillcores and rock samples. *Sedimentary Geology* 94, 1-10.
- SCHAAF M & THUROW J (1997) Tracing short cycles in long records: the study of interannual to inter-centennial climate change from long sediment records, examples from the Santa Barbara Basin. *Journal of Geological Society* 154, 613-622.
- SCHÄFER A (2010) Klastische Sedimente. Fazies und Sedimentstratigraphie. 1. Auflage 2005, durchgesehener und korrigierter Nachdruck, Heidelberg.
- SCHMIDT W & TRUNKO L (1965) Die Basis des Givet im Bereich der Lenneschiefer. *Fortschr. Rheinl. u. Westf.* 9, 807-877.
- SCHMITZ B, PUJALTE V, MOLINA E, MONECHI S, ORUE-EXTEBARRIA X, SPEIJER RP, ALEGRET L, APELLANIZ E, ARENILLAS I, AUBRY M-P, BACETA JI, BERGGREN WA, BERNAOLA G, CABALLERO F, CLEMMENSEN A, DINARÉS-TURELL J, DUPUIS C, HEILMANN-CLAUSEN C, HILARIO ORÚS A, KNOX R, MARTÍN-RUBIO M, ORTIZ S, PAYROS A, PETRIZZO MR, VON SALIS K, SPRONG J, STEURBAUT E & THOMSEN E (2011) The Global Boundary Stratotype Sections and Points for the bases of the Selandian (Middle Paleocene) and Thanetian (Upper Paleocene) stages at Zumaia, Spain. *Episodes* 34, 220-243.
- SCHÖNWIESE C-D (2013) *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. Stuttgart.
- SCHOTT W, JARITZ W, KOCKEL F, SAMES CW, v. STACKELBERG U, STETS J, STOPPEL D, BALDSCHUHN R & KRAMPE K-D (1967) Paläogeographischer Atlas. In: Bundesanstalt für Rohstoffe (Eds.) *Paläogeographischer Atlas der Unterkreide von Nordwestdeutschland mit einer Übersichtsdarstellung des nördlichen Mitteleuropa*. Hannover.
- SCHOTT W, JARITZ W, KOCKEL F, SAMES CW, v. STACKELBERG U, STETS J, STOPPEL D, BALDSCHUHN R & KRAMPE K-D (1969) Erläuterungen. In: Bundesanstalt für Rohstoffe (Eds.) *Paläogeographischer Atlas der Unterkreide von Nordwestdeutschland mit einer Übersichtsdarstellung des nördlichen Mitteleuropa*. Hannover.
- SCHULZ M & MUDELSEE M (2002) REDFIT: estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series. *Computers & Geosciences* 28, 421-426.
- SCHULZ R, HARMS FJ & FELDER M (2002) Die Forschungsbohrung Messel 2001: Ein Beitrag zur Entschlüsselung der Genese einer Ölschieferlagerstätte. *Z. Angew. Geol.* 4, 9-17.
- SCHWARZACHER W (1947) Über die sedimentäre Rhythmik des Dachsteinkalkes von Lofer. *Geologische Bundesanstalt, Verhandlungen* 10-12, 175-188.
- SCHWARZACHER W (1991) Milankovitch Cycles and the Measurement of Time. In: EINSELE G, RICKEN W & SEILACHER A (Eds.) *Cycles and Events in Stratigraphy*. Berlin Heidelberg, 855-863.
- SCHWARZACHER W (1993) Cyclostratigraphy and the Milankovitch theory. *Developments in Sedimentology* 52, Amsterdam.

- SHACKLETON NJ (1995) New data on the evolution of Pliocene climate variability. In: VRBA ES, DENTON GH, PARTIDGE TC & BURCKLE LH (eds.) *Paleoclimate and Evolution, With Emphasis on Human Origins*. New Haven, Ct., 242-248.
- SHACKLETON NJ (2006) Formal Quaternary stratigraphy – What do we expect and need? *Quaternary Science Reviews* 25, 3458-3462.
- SHACKLETON NJ, BERGER AL & PELTIER WR (1990) An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene timescale based on ODP Site 677. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences* 81, 251-261.
- SHACKLETON NJ, HALL MA & PATE D (1995) Pliocene stable isotope stratigraphy of ODP Site 846. In: PISIAS NG, MAYER LA, JANECEK TR, PALMER-JULSON A & VAN ANDEL TH (Eds.) *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* 138, 337-356.
- SHACKLETON NJ, HAGELBERG TK & CROWHURST SJ (1995) Evaluating the success of astronomical tuning – pitfalls of using coherence as a criterion for assessing pre-Pleistocene time scales. *Paleoceanography* 10, 693-697.
- SHACKLETON NJ, HALL MA & VINCENT E (2000) Phase relationships between millennial-scale events 64,000 - 24,000 years ago. *Paleoceanography* 15, 565-569.
- Shen SZ, Crowley JL, Wang Y, Bowring SA, Erwin DH, Sadler PM, Cao CQ, Rothman DH, Henderson CM, Ramezani J, Zhang H, Shen Y, Wang XD, Wang W, Mu L, Li WZ, Tang YG, Liu XLK, Liu LJ, Zeng Y, Jiang YF & Jin YG (2011) Calibrating the end-Permian mass extinction. *Science* 334, 1367-1372.
- Shipboard Scientific Party (2002) Leg 198 summary. In: BRALOWER TJ, PREMOLI SILVA I, MALONE MJ et al. (Eds.) *Proceedings of the Ocean Drilling Program. Initial Reports*, vol. 198. Texas A&M University, College Station TX 77845-9547, USA; [http://www-odp.tamu.edu/publications/198\\_IR/VOLUME/CHAPTERS/IR198\\_01.PDF](http://www-odp.tamu.edu/publications/198_IR/VOLUME/CHAPTERS/IR198_01.PDF).
- Shipboard Scientific Party (2004) Leg 208 summary. In: ZACHOS JC, KROON D, BLUM P et al. (Eds.) *Proceedings of the Ocean Drilling Program. Initial Reports*, vol. 208. Texas A&M University, College Station TX 77845-9547, USA; [http://www-odp.tamu.edu/publications/208\\_IR/VOLUME/CHAPTERS/IR208\\_01.PDF](http://www-odp.tamu.edu/publications/208_IR/VOLUME/CHAPTERS/IR208_01.PDF). Available from: Ocean Drilling Program.
- SMITH DG (1994) Cyclicity or chaos? Orbital forcing versus nonlinear dynamics. In: DE BOER PL & SMITH DG (eds.) *Orbital Forcing and Cyclic Sequences*. IAS Spec. Publ. 19, 531-544.
- SPELL TL & MCDUGALL I (1992) Revisions to the age of the Brunhes-Matuyama boundary and the Pleistocene geomagnetic polarity timescale. *Geophysical Research Letters* 19, 1181-1184.
- STEENBRINK J, VAN VUGT N, KLOOSTERBOER-VAN HOEVE ML & HILGEN FJ (2000) Refinement of the Messinian APTS from sedimentary cycle patterns in the lacustrine Lava section (Servia Basin, NW Greece). *Earth Planet. Sci. Lett.* 181, 161-173.
- STEIN M, WASSERBURG GJ, AHARON P, CHEN JH, ZHU ZR, BLOOM A & CHAPPELL J (1993) TIMS U-series dating and stable isotopes of the last interglacial event in Papua New Guinea. *Geochim. Cosmochim. Acta* 57, 2541-2554.
- STRASSER A, HILGEN FJ & HECKEL PH (2006) Cyclostratigraphy – concepts, definitions, and applications. *Newsl. Stratigr.* 42, 75-114.
- SZURLIES M (2004a) Magnetostratigraphie als Schlüssel zur globalen Korrelation der Germanischen Trias - Fallstudie Unterer Buntsandstein. *Hallesches Jb. Geowiss. B, Beih.* 18, 79-90.
- SZURLIES M (2004b) Magnetostratigraphy: the key to a global correlation of the classic Germanic Trias — case study Volpriehausen Formation (Middle Buntsandstein), Central Germany. *Earth Planet. Sci. Lett.* 227, 395-410.
- TANER MT (2000) Attributes revisited. Technical publication. Rock Solid Images Inc., Houston, TX. [http://www.rocksolidimages.com/pdf/attrib\\_revisited.htm](http://www.rocksolidimages.com/pdf/attrib_revisited.htm).
- THIELE-PFEIFFER H (1988) Die Mikroflora aus dem mitteleozänen Ölschiefer von Messel bei Darmstadt. *Palaeontographica B* 211, 1-86.
- THOMSON DJ (1982) Spectrum estimation and harmonic analysis. *Proc. IEEE* 70, 1055-1096.
- TIEDEMANN R, SARNTHEIN M & SHACKLETON NJ (1994) Astronomic timescale for the Pliocene Atlantic  $\delta^{18}\text{O}$  and dust flux records of Ocean Drilling Program Site 659. *Palaeoceanography* 9, 619-638.
- TIETZE K-W & RÖHLING H-G (2013) Sequenz-, Base-level- und Zyklus-Stratigraphie 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. Schr.-R. dt. Ges. Geowiss. 69, 233-268; Hannover.
- TOUGIANNIDIS N (2009) Karbonat- und Lignitzzyklen im Ptolemais-Becken: Orbitale Steuerung und suborbitale Variabilität (Spätneogen, NW-Griechenland). Sedimentologische Fallstudie unter Berücksichtigung gesteinsmagnetischer Eigenschaften. Diss., Köln.
- TUKEY J (1967) An introduction to the calculations of numerical spectrum analysis. In: HARRIS B (Ed.) Advanced Seminar on Spectral Analysis of Time Series. New York.
- VAIL PR, AUDEMARD F, BOWMAN SA, EISNER PN & PEREZ-CRUZ C (1991) The Stratigraphic Signatures of Tectonics, Eustasy and Sedimentology – an Overview. In: EINSELE G, RICKEN W & SEILACHER A (Eds.) Cycles and Events in Stratigraphy. Berlin Heidelberg, 617-659.
- VAN COUVERING JA, CASTRADORI D, CITA MB, HILGEN FJ & RIO D (2000) The base of the Zanclean Stage and of the Pliocene Series. Episodes 23, 179-187.
- VAN DEN HEUVEL (1966) On the Precession as a Cause of Pleistocene Variations of the Atlantic Ocean Water Temperatures. Geophys. J. R. astr. Soc. 11, 323-336.
- VANDEBERGHE N, HILGEN FJ & SPEIJER (2012) The Paleogene Period. In: GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ MD & OGG GM (Eds.) The Geologic Time Scale 2012. Volume 1/2, Oxford Amsterdam, 855-921.
- VAUGHAN S, BAILEY RJ & SMITH DG (2014) Cyclostratigraphy: data filtering as a source of spurious spectral peaks. In: SMITH DG, BAILEY RJ, BURGESS PM & FRASER AJ (Eds.) Strata and Time: Probing the Gaps in Our Understanding. Geology Society, London, Special Publication 404. First published online May 30, 2014, <http://dx.doi.org/10.1144/SP404.11>.
- VERNEKAR AD (1972) Long-period global variations of incoming solar radiation. Meteorological Monographs 34, 1-20.
- WALBROECK C, DUPLESSY J-C, MICHEL E, LABEYRIE L, PAILLARD D & DUPRAT J (2001) The timing of the last deglaciation in North Atlantic climate records. Nature 412, 724-727.
- WEEDON GP (1991) The Spectral Analysis of Stratigraphic Time Series. In: EINSELE G, RICKEN W & SEILACHER A (Eds.) Cycles and Events in Stratigraphy. Berlin Heidelberg, 840-854.
- WEEDON GP (1993) The recognition and stratigraphic implications of orbital-forcing of climate and sedimentary cycles. In: WRIGHT VP (Ed.) Sedimentology review. Oxford, 31-50.
- WEEDON GP (2003) Time-series analysis and Cyclostratigraphy. Cambridge.
- WESTERHOLD T, RÖHL U, RAFFI I, FORNIACIARI E, MONECHI S, REALE V, BOWLES J, & EVANS HF (2008): Astronomical calibration of the Paleocene time. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 257, 377-403.
- WU H, ZHANG S, HINNOV LA, JIANG G, FENG Q, LI H & YANG T (2013) Time-calibrated Milankovitch cycles for the Late Permian. Nat. Commun. 4:2452 doi: 10.1038/ncomms3452.
- YIN HF, ZHANG KX, TONG JN, YANG ZY & WU SB (2001) The Global Stratotype Section and Point (GSSP) of the Permian-Triassic boundary. Episodes 24, 102-114.
- ZELLER EJ (1964) Cycles and Psychology. In: MERRIAM DF (Ed.) Symposium on cyclic sedimentation. Kansas Geological Survey 169; 631-636.
- ZUIDERVELD JDA, ZACHARIASSE JW, VERHALLEN PJJM & HILGEN FJ (1986) The age of the Miocene-Pliocene boundary. Newsletters in Stratigraphy 16, 169-181.
- Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, WMO/UNEP, [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)) (2007) Klimaänderung 2007. Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. [Nicht-offizielle Übersetzung des Originals durch die deutsche IPCC-Koordinierungsstelle].

Anmerkung: Die Übersetzung der verwendeten Zitate erfolgte durch den Verfasser.

## **Impressum**

Studiengemeinschaft Wort und Wissen e. V.

Geschäftsstelle

Rosenbergweg 29, 72270 Baiersbronn

Tel.: 07442-81006

E-Mail: [sg@wort-und-wissen.de](mailto:sg@wort-und-wissen.de)

Internet: [www.wort-und-wissen.de](http://www.wort-und-wissen.de)