

Festschrift Heißel	Veröffentlichungen der Universität Innsbruck, Bd. 86	Innsbruck, Dezember 1973	Seite 267–279
--------------------	---	--------------------------	---------------

Quantitative Daten über benthische Karbonatsedimentation in mittleren Breiten *)

von

Michael SARNTHEIN **)

STICHWORTE: Benthosökologie, Ostsee, rezente Karbonatsedimente

ZUSAMMENFASSUNG

Zwischen 25 und 54° nördlicher Breite verhält sich weltweit die benthische Karbonatproduktion erstaunlich konstant. Sie liegt in Wassertiefen von weniger als 30–40 m bei 70–1000 g/m²/Jahr. Überdurchschnittlich hohe Werte werden auf Riffen, Seegraswiesen (Epiphyten) und auf subtropischen Flächen (Großforaminiferen-Mollusken-Fazies) beobachtet. Unterhalb von 30–40 m sinkt die Schillbildung allgemein um den Faktor 10 auf 4–80 g/m²/Jahr. Diese Abnahme ist sprunghaft. Sie läßt sich u. U. mit den Auswirkungen der Sprungschicht korrelieren, die häufig in der gleichen Tiefe anzutreffen ist.

Eine solche Annahme wird unterstützt durch erstmalig durchgeführte Experimente mit Schwebesubstraten in der W-Ostsee. Ihre Daten weisen gleichfalls auf eine drastische Abnahme der Schillproduktion durch Mollusken im Bereich der Sprungschicht um den Faktor 7 bis 14. Der Substrattyp hat hingegen weniger Bedeutung für das Ausmaß der Schillproduktivität.

ABSTRACT

A fairly constant benthic carbonate production is found worldwide between 25 and 54° N. It reveals approximately 70–1000 g/m²/year at water depths less than 30 to 40 m. Unusual high values were reported from reefs, sea grass beds (epiphytic communities) and from tops of subtropical banks (large foraminiferal molluscan facies). Deeper than 30–40 m the formation of skeletal generally falls by the factor 10 to 4–80 g/m²/y. It is an abrupt decrease which might be correlated with effects of the halocline which is frequently found at similar depths.

*) Beitrag Nr. 18 aus dem Sonderforschungsbereich 95 „Wechselwirkung Meer-Meeresboden“ der Universität Kiel.

**) Anschrift des Verfassers: Prof. Dr. Michael Sarnthein, Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Kiel, BRD.

This suggestion is supported by data from experiments with artificial substrates first time realized in the Western Baltic Sea. They show a similar decrease of e. g. molluscan carbonate production in the range of the halocline from 1 to 0,07 g/m²/y fortnight. Differences of substratum seem to exert only a minor control on the extent of carbonate production.

EINFÜHRUNG

Mit den 50er Jahren setzte wellenartig eine intensive Erforschung rezenter Karbonat-sedimente ein. Sie ging von England und den U. S. A. aus und erhielt vielfach ihren Anstoß von Erfordernissen der Erdölwirtschaft. Folgerichtig konzentrierte sich ihr Interesse auf die modellartige Beschreibung und Klassifizierung von Riffen und subtropischen Karbonatplattformen. Sie fand vorläufige Höhepunkte in zahlreichen richtungsweisenden Arbeiten über Flachwassersedimente von Südflorida (u. a. GINSBURG 1956), der Bahama Plattform (u. a. ILLING 1954, IMBRIE & PURDY 1962, CLOUD 1962) und des südwestlichen Persischen Golfs (u. a. Sedimentology 12/1, 1969, PURSER, edit., 1973).

Differenzierte quantitative Angaben über die benthisch-biogene Karbonatproduktion wurden jedoch bisher, auch in der meeresbiologischen Literatur, erst relativ wenig bekannt. Im Gegensatz dazu sind Daten über die Planktonproduktion viel häufiger (vgl. BERGER 1971). Die Frage des im Fossilen arbeitenden Geologen: „Welche Zeit steckt in einer Schillbank, oder in einer Filamentkalkbank?“ ist also derzeit noch schwierig zu beantworten. Mehrere Untersuchungen gibt es über das größtmäßig weit herausfallende Riffwachstum (u. a. CHAVE et al. 1972, ZANKL et al. 1972). Eine erste Hochrechnung über benthische Karbonatbildung im Nichtriff fand sich 1962 bei CLOUD. Seine Schätzungen fußten auf noch rohen Daten über Karbonatmasse und Wachstumsrate der Grünalgen.

STOCKMAN et al., 1967, publizierten schließlich die ersten Daten, die sich auf längerfristige Dauerbeobachtungen an Benthos, verteilt auf zahlreiche, sorgfältig ausgewählte Testböden vor S-Florida stützen konnten (Fig. 1). Die Grünalge *Penicillus* sp., z. B. besitzt demnach eine Lebensspanne von etwa 30–63 Tagen und deutlich abgestufte Siedlungsdichten und Karbonatmengen in Abhängigkeit vom Ort des Vorkommens (z. B. 78–108 Individuen à ϕ 0,17 g/m² auf Schlammhängen). Ihr Beitrag zur Aragonit-schlamm-bildung liegt damit zwischen 0,3–1,0 cm/1000 J. in der Florida Bay und 2,3 cm/1000 J. im Riff. Unter Berücksichtigung der Korngrößenanteile sowie der anderen Karbonatproduzenten im Sediment würden sich hieraus Gesamtbeträge von ca. 80 bzw. 220 m biogenem Flachwasserkarbonat pro Million Jahre ergeben. Solche Modellwerte für die Sedimentationsverhältnisse niederer Breiten fänden ihre Entsprechung auch durchaus im Fossilen, z. B. im alpinen Wettersteinkalk oder Hauptdolomit.

Rezente Karbonatsedimente, und ihre fossilen Gegenbeispiele, beschränken jedoch ihr Vorkommen nicht auf die relativ wohldurchforschten tropisch-subtropischen Flachwasserzonen, wie erst LEES & BULLER (1972) treffend herausstellten. In Form von Schillen und Krusten bedecken sie vielmehr auch weite Schelfgebiete in mittleren Breiten und größeren Wassertiefen bis zu mehreren 100 m, z. B. den Schelf vor Irland (u. a. CURRY et al. 1972) oder als „Coralligène“ die Schelfböden des Mittelmeers (u. a. PAUL 1970).

Der Umfang dieser Sedimentbildung wurde in letzter Zeit ebenfalls mit quantitativen Daten etwas aufgehellert. Angeregt durch SMITH (1970 a) wird einiges davon im Folgenden übersichtsmäßig zusammengetragen, um zu Vergleichen mit fossilen Karbonatgesteinen anzuregen (Fig. 1). Der Versuch, diese Daten mit einzelnen Parametern des Ablagerungsraumes zu korrelieren, erweist sich allerdings als schwierig bis unmöglich. Eine Reihe von Milieufaktoren überlappen sich nämlich mit ihrer Auswirkung. Beispielsweise gehen größere Tiefen vielfach mit feineren Sedimenten einher, so daß sich ihr Einfluß kaum gesondert beobachten läßt. Ein weiterer Abschnitt der Arbeit stellt daher erstmals ein Experiment mit Schwebesubstraten in der westlichen Ostsee vor. Seine Anlage und erste Ergebnisse versprechen u. a., die genannten Schwierigkeiten teilweise zu überwinden.

VERGLEICH DER BENTHISCHEN KARBONATPRODUKTION AUF VERSCHIEDENEN SCHELFGEBIETEN

Mengendaten der benthischen Karbonatproduktion lassen sich überschlagsmäßig auf zweierlei Weise ermitteln:

1. Eine Durchschnittsmenge Lebendkarbonatschill pro Einheitsfläche wird mit den jährlichen Fortpflanzungsraten der zugehörigen Arten multipliziert;
2. Die Sedimentationsraten von altersdatierten Kernproben werden auf die benthischen Sedimentanteile aufgeschlüsselt.

In Fall 1 werden eigentlich rezente Bruttowerte gemessen: Sie berücksichtigen weder postmortale Umlagerung noch Auflösung von Schalenmaterial (in der Ostsee z. B. fallen bis zu 100% des Schills der diagenetischen Schalenauflösung wieder zum Opfer). Sie mitteln jedoch im allgemeinen die Produktionsverhältnisse weiterer Gebiete. Ungenauigkeiten ergeben sich durch längerfristige Schwankungen der Bioproduktion, ferner aus teilweise nur ungenau bekannten Wachstums- und Reproduktionsraten, die schließlich auch noch von wechselndem Wegfraß abhängen. (Zur Berechnung der Karbonatproduktion von Foraminiferen vgl. SMITH 1971.)

In Fall 2 werden Nettobeträge der Karbonatsedimentation bestimmt, die die Ablagerungsverhältnisse u. U. von mehreren 1000 Jahren mitteln, Schichtlücken selbstverständlich mit eingeschlossen. Diese Werte eignen sich insofern etwas besser zum direkten Vergleich mit Fragestellungen im Fossilen.

Die zwei verschiedenen Datenquellen führen auch zu zweierlei Ausdrucksweise der Ergebnisse: In Fall 1 werden sie als $\text{g/m}^2/\text{Jahr}$, in Fall 2 zumeist als $\text{cm}/1000 \text{ Jahre}$ dargestellt, wobei in letztere Porenvolumen und Kompaktion der Karbonate mit eingehen. Zur gegenseitigen Umrechnung der beiden Maße empfiehlt sich – im Fall von Schill – ein Verhältniswert von 1 ($\text{cm}/1000 \text{ J.}$) zu 20 ($\text{g/m}^2/\text{J.}$) bis 1 zu 16. Er sinkt z. B. bei algengebildetem Aragonitschlamm auf rund 1 zu 12. In Fig. 1 wird einheitlich ein Verhältnis von 1 : 20 verwendet.

Ein Vergleich der verschiedensten quantitativen Angaben über benthische Karbonatproduktion in Meeresgebieten zwischen 0 und 54° nördlicher Breite führt zu einer Reihe von Beobachtungen. (Vgl. Fig. 1, mit Angabe der Literaturquellen):

- Die bei weitem größten Karbonatmengen werden im Riff, aber auch im felsigen Gezeitenbereich gemäßiger Breiten gebildet ($1000\text{--}10\,000 \text{ g/m}^2/\text{J.}$).

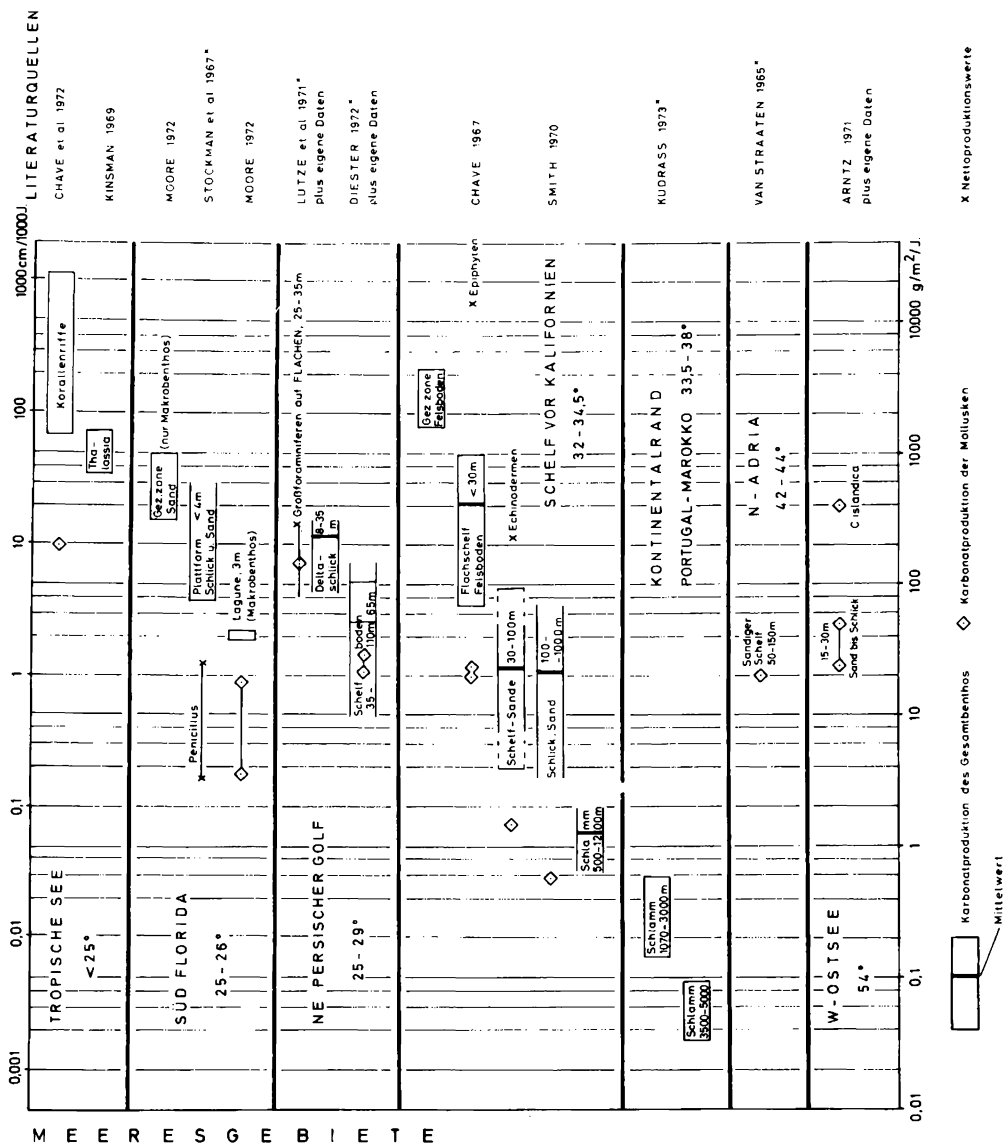


Fig. 1: Benthische Karbonatproduktion in verschiedenen Meeresgebieten, gereiht nach ihrer geographischen Breite. Die Produktion liegt am Flachscheiff eine Größenordnung niedriger als im Riff und eine höher als am tieferen Schelf. Am Kontinentalhang nimmt die Produktion um weitere Größenordnungen ab.

- Von niedrigen bis zu gemäßigten Breiten bleibt am Schelf der Umfang der Karbonatproduktion, gleiche Wassertiefe vorausgesetzt, weitgehend konstant, obwohl die benthischen Schillbildner merklich wechseln (CHLOROZOAN- in niedrigen, FORAMOL-Gruppe in gemäßigten Breiten, nach LEES et al., 1972).
- Die Karbonatmengen des Flachschelfs (bis 30–35 m) liegen, auch in der Florida Bay, mit 70 bis 1000 g/m²/J. (entsprechend 4–50 cm/1000 J.) etwa ein bis zwei Größenordnungen unter jenen der Riffe.
- Auf mehreren Schelfgebieten (Persischer Golf, Kalifornischer Schelf, Adria) kommt es gleichermaßen zu einem deutlichen Rückgang der Karbonatproduktion bei rund 30 bis 35 m Tiefe, wiederum um etwa eine Größenordnung. Weitere stufenweise Rückgänge liegen am Kontinentalhang.
- Die Karbonatproduktion von Mollusken läuft etwa den Gesamtbeträgen parallel. Ein Sonderfall hoher Produktion stellt die Großforaminiferen-Mollusken-Fazies im Persischen Golf dar, wo die Karbonatbildung der Mollusken ungefähr derjenigen im Riff entspricht.

Die herausragend hohe Karbonatproduktion der Riffe ist altbekannt. Sie wurde zuletzt erst von CHAVE et al. (1972) ausführlich behandelt. Ihr Zustandekommen in Abhängigkeit von Temperatur-, Licht- und Nahrungsangebot wird daher hier nicht näher diskutiert. Es soll lediglich eine Beziehung hervorgehoben werden: Die Nettoproduktion von Karbonat steht im Gezeitenraum „Riff“ in direktem Zusammenhang mit dem langfristigen Anstieg bzw. Fallen des Meeresspiegels, ein Faktor, der nur hier, bei den übrigen Ablagerungsraumtypen jedoch mit zunehmender Tiefe kaum mehr zur Geltung kommt.

Seegraswiesen bilden im Flachwasser einen zweiten Sonderfall mit ausnehmend hoher Karbonatproduktion. Auf ihnen siedelt eine dichte Gemeinschaft kalkschaliger Epiphyten: u. a. Foraminiferen, Bryozoen, Serpeln und Rotalgen. LEE et al. zählten beispielsweise durchschnittlich 40, maximal 425 Foraminiferen pro Gramm Trockengewicht einer Substratpflanze. Das entspräche nach SMITH (1970 a) einer Karbonatmenge von 2×10^3 g. Auch KINSMAN (1969) berichtet von hohen Karbonatmengen auf Thalassiwiesen (Fig. 1). Diese Form der Karbonatproduktion endet zwar mit der Lichteindringtiefe im Wasser (30–40 m). Sie bleibt jedoch relativ gleichförmig bis in hohe geographische Breiten (DEN HARTOG, 1970). Weitreichende postmortale Umlagerung der Epiphyten bedingt allerdings, daß diese Fazies nur schwer in fossilen Sedimenten wieder zu erkennen ist. Sie dürfte damit zur Deutung fossiler Sedimentationsraten eher ausscheiden, obwohl ihr sicher schon seit geraumer Zeit eine wichtige Rolle für die Sedimentbildung zukommt.

LUTZE (1970) und LUTZE et al. (1971) machten schließlich noch auf einen dritten Spezialfall überdurchschnittlich großer Karbonatproduktion aufmerksam: auf die Großforaminiferen-Mollusken-Fazies des Persischen Golfs. Auf Grund von Labordaten fand er für die Großforaminifere *Heterostegina* Werte von 150 g/m²/J. Zusammen mit den Mollusken, die in dieser Fazies etwa gleich viel Sediment bilden, erhielt man damit über 10–20 cm/1000 J. Diese Fazies entsteht auf isolierten Flächen. Mit ihren Grobsand- und Kiesböden, ihrer guten Durchlichtung und Wellendurchströmung (SARNTHEIN, 1970 und 1971) sowie mit ihrem klarem Wasser (ZIEGENBEIN, 1966) zeigen die Fläche viele

Ähnlichkeiten zu Riffen. Sie unterscheiden sich nur durch etwas größere Tiefen (25–40 m) und geringere Temperaturen (im Persischen Golf zumeist um 20° C und wenig darunter). VAN ANDEL et al. (1967) beschreiben gleiche Sedimente von Bänken der Timor See in 10–12° S Breite. Eine analoge Deutung fossiler Großforaminiferenkalke erscheint naheliegend.

Bei den Karbonatwerten am Schelf sind vor allem zwei Beobachtungen erstaunlich: einmal ihre Konstanz bis hoch in mittlere Breiten, zum anderen ihr genereller abrupter Rückgang bei Tiefen von ca. 30–35 m. Jeder Deutungsversuch von diesem Wechsel zeigt, auf wie wenig Datenmaterial man bisher zum Zweck einer genaueren Korrelation zurückgreifen kann.

In Analogie zu Verhältnissen im Persischen Golf (SARNTHEIN 1970) spricht z. B. vieles dafür, daß jene Wassertiefenmarke in vielen Gebieten mit der Lage der Sprungschicht in Zusammenhang zu bringen ist, und damit auch mit einer über längere Zeit gemittelten Untergrenze „normaler“ Wellenwirkung, bis zu der hinunter ein Wasserkörper immer wieder homogenisiert wird. Die Ursache des Produktionsabfalls von Benthos ist damit allein jedoch noch nicht geklärt. Sie könnte erstens in einem Umschlag zu für Benthos ungünstigeren Substrattypen liegen. So nehmen z. B. in der W Ostsee unterhalb der Sprungschicht* schlechtdurchlüftete Schlickböden schlagartig zu, und die Schillproduktion, die noch um die Sprungschicht herum ihre Maximalwerte erreicht, sinkt wenige m darunter auf Bruchteile. Nur *C. islandica* bildet dort noch wenige, fleckig verteilte Produktionsmaxima (Fig. 1). Trotzdem ist die Rolle des Substrats als Hauptfaktor damit noch nicht nachgewiesen.

Eine zweite Hauptauswirkung der Sprungschicht, sowie generell größerer Wassertiefen, dürfte für das Benthos in einem stark herabgesetzten Angebot suspendierter Nährstoffe liegen. KUDRASS (1973) konnte z. B. am Kontinentalrand vor Portugal und Marokko sehr überzeugend eine lineare Beziehung zwischen sinkenden Sedimentationsraten von Plankton- und Benthosforaminiferen nachweisen. In ähnliche Richtung zielen Deutungen in der Adria (RIEDL, 1964), dem Schelf vor Kalifornien (PEQUEGNAT 1961) und dem Persischen Golf (SARNTHEIN 1970).

Ein dritter möglicher Grund für den Rückgang von Benthoskarbonat bei 30–40 m liegt vielleicht im Seegrasbewuchs, der in diesen Tiefen etwa endet und damit auch die Epiphytenproduktion stoppt. Schließlich wären noch alle unmittelbaren Einflüsse abnehmender Licht-, Temperatur- und Strömungsverhältnisse sowie eine abnehmende CaCO₃-Sättigung (SMITH 1970) für das Benthos in Rechnung zu stellen. Sie sind jedoch bisher, von wenigen Laborversuchen abgesehen, in ihrer Auswirkung auf Benthos getrennt kaum erfaßt worden.

Die benthischen Sedimentationsraten teilen sich auf wenige Hauptgruppen von Schillbildnern auf und lassen sich damit auch nach Karbonatmineralen ungefähr aufschlüsseln. Nach SMITH (1970) umfaßt Aragonit am kalifornischen Schelf im Durchschnitt 11%, Mg-Kalzit (mit einem mittleren Mg-Anteil von 10% im Kalzit) den

* Sprungschichten sind Grenzflächen zwischen Wasserkörpern unterschiedlicher Dichte. Sie leiten sich im Meer aus sprunghaften Änderungen der Temperaturen und/oder der Salzgehalte her, bedingt z. B. durch den Tiefgang der Oberflächen-Wassererwärmung.

Rest der Karbonatproduktion. Bemerkenswerte Trends in der Verteilung wurden jedoch bisher nicht bekannt, wenn man von lagunären Extremmilieus einmal absieht.

Den rezenten Benthoskarbonaten des tieferen Schelfs und obersten Kontinentalhangs entsprechen im Fossilen eine Reihe mikritischer Filamentkalke. Sie zeichnen sich z. T. durch Cephalopodenreichtum und ab Jura durch einen zunehmenden Planktongehalt aus (z. B. der Ceratitenkalk der Germanischen Trias, Hallstätter Kalke, südalpine Jurakalke). Im allgemeinen werden sie als „pelagisch“ oder als „Schwellenfazies“ angesprochen. Die im Rezenten als so konstant auftretenden benthischen Sedimentationsraten von 2 bis 25 m/Mio. J. (Fig. 1) ließen sich wahrscheinlich zwanglos auf diese fossilen Beispiele übertragen (vgl. auch BERNOULLI, 1972). Unterhalb von 400 m Tiefe tritt dann das Sedimentationspotential von Benthos, speziell von Mollusken sehr stark zurück (SARNTHEIN, 1971).

SCHILLPRODUKTION AUF SCHWEBESUBSTRATEN

Im vorigen Abschnitt wurde auf die Notwendigkeit verwiesen, verschiedene marine Umweltfaktoren einmal einzeln und quantitativ in ihrer natürlichen Auswirkung auf die benthische Schillproduktion kennen zu lernen. Diese Fragestellung diente als Ausgangspunkt für die Inangriffnahme eines Experiments mit „Schwebesubstraten.“ Anregend wirkte dafür die Mitarbeit in einer interdisziplinären Forschungsgruppe, der ein kleines, durch Tonnen fest begrenztes „Hausgarten“-Seegebiet als Versuchsfeld zur Verfügung steht (Sonderforschungsbereich 95, Kiel, Gruppe B 1).

In 19, 15 und 11 m Wassertiefe wurden dort drei Schwebepattformen verankert, die 2–5 m über dem Meeresboden in je drei Wannen Feinsand, Kies und Tonschlamm als gängige Substrattypen einer völligen Neubesiedlung aussetzen (vgl. Fig. 2; technische Einzelheiten in SARNTHEIN & RICHTER, in Vorbereitung). Z. B. werden Tonsedimente, die normalerweise in größerer Tiefe vorkommen, auf diese Weise nahe an die Wasseroberfläche gebracht. Gleichzeitig können Kiese und Sande auch in größerer Tiefe auf ihre Besiedlungseigenschaften untersucht werden. Betreut durch cand. geol. W. RICHTER wurden mit Hilfe einer Tauchgruppe aus den Substraten seit Juli 1972 kontinuierlich hunderte von Proben genommen und auf ihre Faunen untersucht (Individuen- und Artenzahl, Schalengewichte und -größen).

Die Resultate sollen, nach Substratarten getrennt, über kontinuierliche Meßreihen mit jenen Faktoren korreliert werden, die vielfach unter dem Begriff „Wassertiefe“ summiert werden: mit dem Licht, der Temperatur und der Salinität, und auf diese Weise auch mit der Lage der „Sprungschicht“. Ferner werden sie mit dem O₂-Gehalt des Wassers und dem Nährstoffanfall durch Planktonsedimentation verglichen (die noch unveröffentlichten Datenunterlagen wurden dafür von Herrn K. v. BRÖCKEL sowie V. SMETACEK im Rahmen des SFB 95 freundlicherweise zur Verfügung gestellt).

Die arbeitsaufwendige Auswertung der Substratproben lieferte bisher erst Daten über Mollusken im wesentlichen aus 15 und 19 m Tiefe vom Spätsommer und Herbst 1972. Einer späteren, umfassenden Darstellung vorgehend, (SARNTHEIN & RICHTER, in Vorbereitung), werden diese ersten Ergebnisse in Fig. 3 zusammengefaßt und Temperatur- und Salinitätskurven des Aufwuchszeitraumes gegenübergestellt. Fleckenhaftigkeit in der Besiedlung und die vorläufige Kürze der Meßreihen sind als Hauptfehlerquellen der Daten zu betrachten.

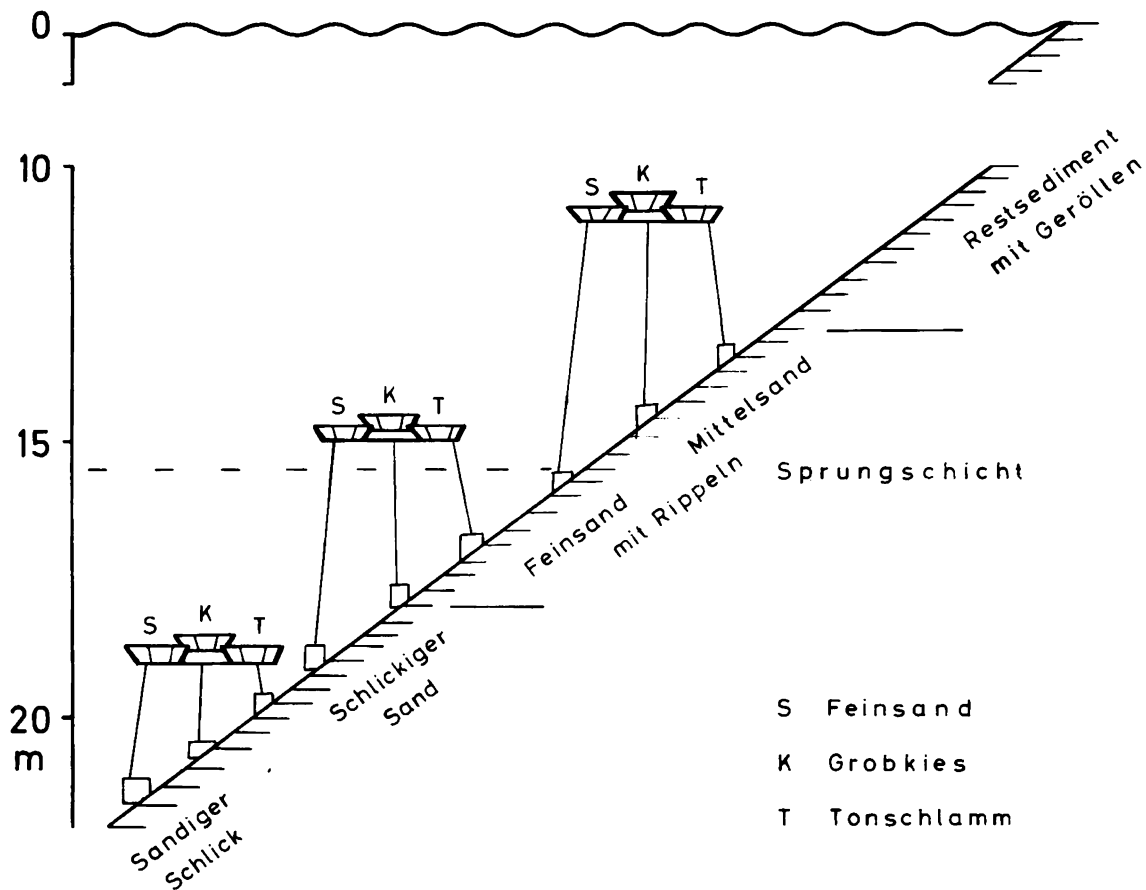


Fig. 2: Modell der Schwebepattformen in der westlichen Ostsee. Die einzelnen Sedimentwannen haben einen Durchmesser von 71 und eine Tiefe von 25 cm. Sedimente am Meeresboden nach WEFER 1972.

Neben deutlichen Unterschieden in der Artenverteilung (u. a. Dominanz von *Mytilus edulis* in 11 m, von *Cardium fasciatum* in 19 m Tiefe) beobachtet man bei dem Besiedlungsexperiment zunächst ein wassertiefenparalleles Absinken der Individuenzahlen (Fig. 3: B; Abnahme von 15 auf 19 m um den Faktor 2 bis 9). Die Unterschiede zwischen den einzelnen Substratarten liegen scheinbar in einer ähnlichen Größenordnung. Dieser Eindruck beruht jedoch eher auf der angewandten Darstellungsweise, einer Momentaufnahme. Beispielsweise war die Individuenzahl auf Tonschlamm in 19 m Tiefe offenbar nur anfänglich bei der Ansiedlung behindert. Sie überholte nach Ablauf von 4 Monaten die Werte der beiden übrigen Substrate.

Einen Einblick in Wachstumsraten soll die Größenverteilung von *Cardium*-Klappen bieten (Fig. 3: C; Messungen durchgeführt auf der TGZ 3 Automatik von C. ZEISS). Dabei zeigt sich, daß auf Kies die mittleren Größen in 11 m Tiefe um fast das 3fache, die Maximalgröße sogar um das 3- bis 8fache denen von 19 m voraneilen.

Ansiedlungs- und Wachstumsrate der Mollusken bedingen gemeinsam die Produktionsrate von Schillkarbonat. Sie wurde im 14-Tage-Rhythmus aus der Differenz der Schillgewichte von Probennahme zu Probennahme errechnet, einmal getrennt nach Arten und einmal für den Gesamtschill der Mollusken. Auf Sand- und Kiesböden, z. B. (Fig. 3: D), steigt die Produktion ungemein drastisch von 19 auf 15 m Tiefe an: bei Gesamtschill bis auf $100 \times 10^{-2} \text{ g/m}^2/14 \text{ Tage}$, d. h. um den Faktor 14, bei *Cardium* im Mittel bis auf $16 \times 10^{-2} \text{ g/m}^2/14 \text{ Tage}$, d. h. um den Faktor 6,5. Wenn man eine etwas gebremste Anlaufphase der Besiedlung auf 19 m miteinrechnet, erhöht sich dieser Faktor auf 10. Solche Anfangsschwierigkeiten machten sich am kürzesten bei Kies und am längsten bei Tonschlamm bemerkbar, der jedoch nach 4 Monaten schließlich die anderen Substrate mit $17,5 \times 10^{-2} \text{ g/m}^2/14 \text{ Tage}$ überholte.

Die aufgezählten Meßwerte der Schillproben sind zunächst am einfachsten mit Temperatur- und Salinitätskurven der Wassersäule zu korrelieren (Fig. 3: A). Absolut genommen sind zwar die durchschnittlichen Änderungen von Temperatur (-2°C) und Salinität ($+2,7\text{‰}$) von 15 auf 19 m gering. Sie steigen jedoch in ihrer Bedeutung dadurch, daß sie sich zur Hauptsache auf einen schmalen Tiefenbereich zwischen 15 und 16 m zusammendrängen, der für die sommerliche Ostsee typischen Sprungschicht. Die mittleren Temperaturen schwanken hier um 1°C , die maximalen um 2°C , die Minimalsalinität um $1,3\text{‰}$ und die mittlere Salinität um $1,7\text{‰}$. Unabhängig von diesen Meßwerten wurde die Sprungschicht auch wiederholt von den Tauchern in dieser Tiefe als spürbare Temperatur- und Sichtgrenze zwischen zwei Wasserkörpern festgestellt. Die 15-m-Plattform liegt dabei gerade noch mehrheitlich im oberen Wasserkörper, der für die Ansiedlung und Entwicklung (Wachstumsraten!) des Benthos erhebliche Vorteile zu bieten scheint, u. a. auch durch größeren Anfall von Organodetritus als Nahrung.

Faßt man alle bisher vorliegenden, auch die in Fig. 3 nicht mitdargestellten Daten in einer Betrachtung zusammen, so zeigt sich, daß die Schillproduktion sich mit der Wassertiefe wesentlich stärker ändert als mit einem Wechsel der Substrate. In dem Fall der Plattformen von 15 und 19 m Tiefe dürfte wohl das Queren der Sprungschicht mit eine Hauptrolle spielen. In Absolutwerten pro Jahr ausgedrückt, sinkt hier die herbstliche Schillbildung von ungefähr 26 auf $1,8 \text{ g/m}^2$, d. h. um den schon erwähnten Faktor 10 bis 14. Die $26 \text{ g/m}^2/\text{Jahr}$ entsprechen übrigens auch gut den Angaben für die Ostsee auf Fig. 1.

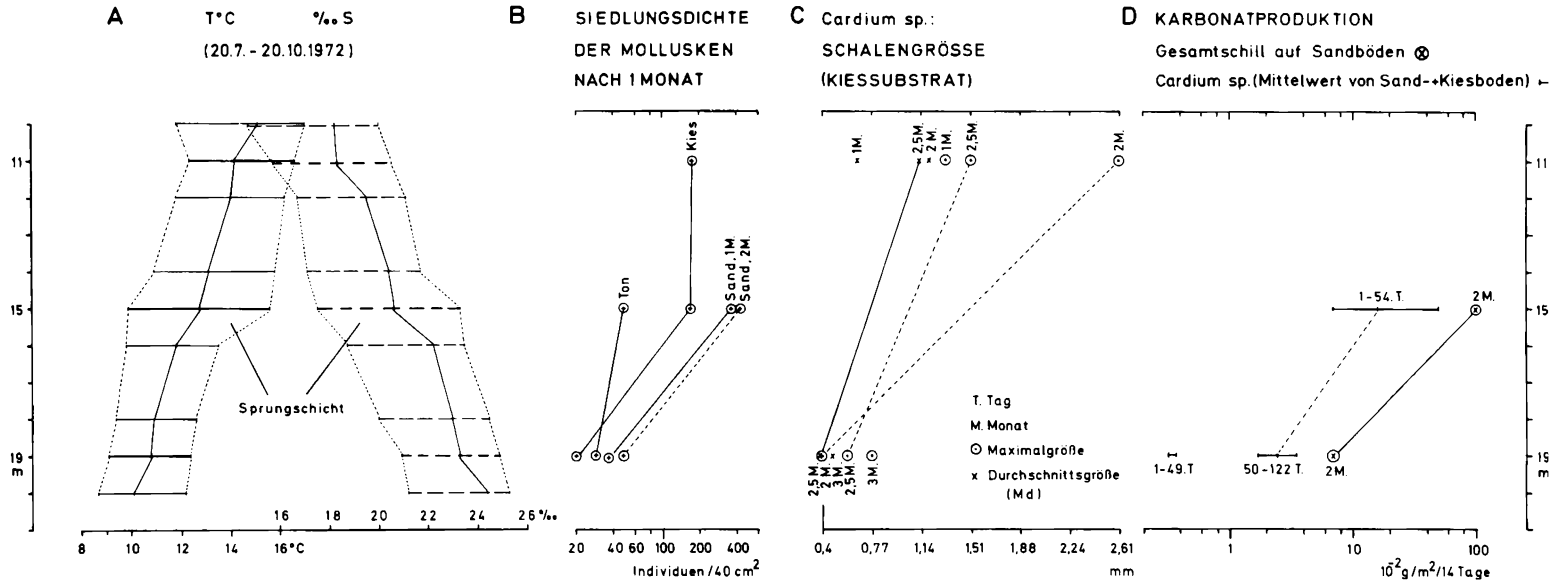


Fig. 3: Erste Daten über die Karbonatproduktion auf Schwebesubstraten in 11, 15 und 19 m Tiefe vom Spätsommer und Herbst 1972. Individuenzahlen (B), Schalengröße (C) und -produktion (D) werden Temperatur- und Salinitätskurven (Mittel- und Extremwerte) aus der Aufwuchszeit (A) gegenübergestellt.

Vergleicht man demgegenüber innerhalb einer Wassertiefe die Produktion von Ton-, Sand- oder Kiesböden, so treten nur unbedeutendere Unterschiede zu Tage, etwa der einer anfänglich etwas erschwerten Ansiedlung auf Tonschlamm. Sie heben sich jedoch bereits nach 1 bis 3 Monaten wieder auf. Zum Beispiel beträgt die Durchschnittsproduktion für *Cardium* in 15 m auf Tonschlamm $11,2 \times 10^{-2} \text{ g/m}^2/14$ Tage im Vergleich zu $16 \times 10^{-2} \text{ g}$, dem Mittelwert von Sand und Kiesboden.

Schließlich wäre noch zu überlegen, welche Einflüsse die Ergebnisse der Schwebesubstrate so stark verzerren könnten, daß sie damit unbrauchbar würden. Mögliche Störfaktoren sind der Abstand der Substratwannen vom Meeresboden, Wegfraß der Jungtiere durch Seesterne und Fische, mechanische Erosion, sowie frühzeitige Schalenauflösung (bisher u. d. M. nicht beobachtet).

Die Plattformen wurden in 2–5 m Bodenabstand verankert, um ihre anfangs unbesiedelten Substrate vor seitlicher Einschwemmung örtlicher Sedimente und Schille zu schützen, ferner vor einer Abweidung durch räuberische Seesterne. Die frisch aufwachsende Muschelbrut unterliegt auf diese Weise nur einem „adaequaten“ Wegfraß durch die mitaufwachsenden jungen Seesterne sowie durch Fische. Im Zusammenhang mit dem Bodenabstand wurde jedoch bisher kein Hemmnis für die Besiedlung mit Larven von Mollusken und anderen Gruppen beobachtet. Im Gegenteil, die am schwächsten besiedelte Plattform in 19 m hat mit 2 m gerade den geringsten Abstand zum Boden. – Aufgrund einer gezielten Konstruktionsweise der Sedimentbehälter (SARNTHEIN & RICHTER, in Vorbereitung) wurden bisher nur in 11 m Tiefe leichte Anzeichen mechanischer Erosion (Rippelmarken auf Feinsand) vorgefunden. Es ist von dieser Seite somit keine bedeutende Verminderung der Schillproduktionswerte zu erwarten. Insgesamt dürfte somit das Datenmaterial der Schwebesubstrate eine recht verlässliche Grundlage für die dargestellten Schlußfolgerungen bieten.

DANKSAGUNG

Herr cand. geol. W. RICHTER hat im Rahmen einer Diplomarbeit das Projekt der Schwebesubstrate mit großem Einsatz in Tauch- und Laborarbeit zur Betreuung übernommen und stellte mir freundlicherweise die gewonnenen Daten zur Verfügung. Die Kollegen am Institut, besonders Dr. E. SUESS, Dr. D. FÜTTERER und Dr. F. WERNER unterstützten mich ebenso wie viele Kollegen im SFB 95 mit anteilvoller Diskussion. Frau B. Salomon besorgte die Reinzeichnung der Abbildungen. Ihnen allen sei an dieser Stelle dafür aufrichtig gedankt.

Aufbau und Betreuung der Schwebesubstrate wurden durch Mittel des Sonderforschungsbereiches 95 Kiel wertvoll gefördert.

LITERATURVERZEICHNIS

- ARNTZ, W. E., 1971: Biomasse und Produktion des Makrobenthos in den tieferen Teilen der Kieler Bucht im Jahre 1968. – Kieler Meeresforsch., 27, 36–72.
- BERGER, W. H., 1971: Sedimentation of Planktonic Foraminifera. – Mar. Geol., 11, 325–358.
- BERNOULLI, D., 1972: 28. North Atlantic and Mediterranean Mesozoic Facies: a Comparison. – Initial Rep. DSDP, XI, 801–871.
- CHAVE, K. E., 1967: Recent carbonate sediments – an unconventional view. – J. Geol. Education, 15, 200–204.
- CHAVE, K. E., SMITH, S. V., ROY, K. J., 1972: Carbonate Production by Coral Reefs. – Marine Geology, 12, 123–140.
- CLOUD, Pr. E., 1962: Environment of Calcium Carbonate Deposition West of Andros Island Bahamas. – Geological Survey prof. paper 350, S. 1–138.
- CURRY, D., HAMILTON, D., SMITH, A. J., MURRAY, J. W., CHANNON, R. D., WILLIAMS, D. N. & C. A. WRIGHT, 1972: Some Research Projects in Submarine Geology of the Bristol University Group. – Mem. B. R. G. M., 79, 221–228.
- DEN HARTOG, C., 1970: The Seagrasses of the World. – Verh. Afd. Nat. kd. Kon. Ned. Ak. Wet., 59/1.
- DIESTER, L., 1972: Zur spätpleistozänen und holozänen Sedimentation im zentralen und östlichen Persischen Golf. (Late Pleistocene and Holocene Sedimentation in the Central and Eastern Persian Gulf). – „Meteor“ Forsch. Erg., Reihe C, 8, 37–83.
- GINSBURG, R. N., 1956: Environmental relationships of grain size and constituent particles in some south Florida carbonate sediments. – Bull. AAPG, 40, no. 10, p. 2384–2427.
- ILLING, L. V., 1954: Bahaman Calcareous Sands. – Bull. AAPG., 38, 1–95.
- IMBRIE, J. & PURDY, E. G., 1962: Classification of Modern Bahamian Carbonate Sediments. In: Classification of Carbonate Rocks. – Memoir 1, A. A. P. G. S. 253–272.
- KINSMAN, D. J. J., 1969: zitiert in SMITH, St. V., 1970, p. 100.
- KURDRASS, H.-R., 1973: Sedimentation am Kontinentalhang vor Portugal und Marokko im Spätpleistozän und Holozän. – Meteor. Forsch. Erg., Reihe C, 13, 1–63.
- LEE, J. J., W. A. MULLER, R. J. STONE, M. E. McENERY & W. ZUCKER, 1969: Standing Crop of Foraminifera in Sublittoral Epiphytic Communities of a Long Island Salt Marsh. – Mar. Biol., 4, 44–61.
- LEES, A. & A. T. BULLER; 1972: Modern Temperate-Water and Warm-Water Shelf Carbonate Sediments. – Mar. Geol., 13: M 67–M 73.
- LUTZE, G. F., 1971: Organic Remains as Sediment Particles: Observations and Experiments with Benthic Foraminifera. – Proc. Joint. Oceanogr. Assembly, S. 285–286 (Abstract), Tokyo.
- LUTZE, G. F., GRABERT, B. & SEIBOLD, E., 1971: Lebendbeobachtungen an Groß-Foraminiferen (Heterostegina) aus dem Persischen Golf. – „Meteor“-Forsch. Ergebn., Reihe C/6, 21–40, 3 Taf., 11 Abb., 2 Tab.
- MOORE, H. B., 1972: An Estimate of Carbonate Production by Macrobenthos in some Tropical Soft-Bottom Communities. – Mar. Biol., 17, 145–148.
- PAUL, J., 1970: Sedimentgeologische Untersuchungen im Limski Kanal und vor der istrischen Küste (nördliche Adria). – Göttinger Arb. Geol. Paläont. 7, 75 S., 43 Abb., 25 Taf.
- PEQUEGNAT, W. E., 1961: New World for Marine Biologists. – Natural History, 70/4: 8–17.
- PURSER, B., (edit.) 1973: Persian Gulf Symposium (Springer Verlag).
- RIEDL, R., 1964: 100 Jahre Litoralgliederung seit Josef LORENZ, neue und vergessene Gesichtspunkte. – Int. Revue ges. Hydrobiol., 49 (2): 281–305.
- SARNTHEIN, M., 1970: Sedimentologische Hinweise für die Untergrenze der Wellenwirkung im Persischen Golf. – Geol. Rdsch. 59/2, 649–666, 7 Abb.
- SARNTHEIN, M., 1971: Oberflächensedimente im Persischen Golf und Golf von Oman. II. Quantitative Komponentenanalyse der Grobfraction. – „Meteor“ Forsch. Erg., Reihe C/5, 113 S., 45 Abb., 8 Tab., 4 Taf.
- SARNTHEIN, M. & W. RICHTER, 1974: Submarine Experiments on Benthic Carbonate Production in the Baltic Sea. – Mar. Biol. (in Vorber.).

- SMITH, ST. V., 1970: Calcium Carbonate Budget of the Southern California Continental Borderland. – Hawaii Inst. Geoph., Univ. Hawaii, HIG-70-11.
- SMITH, S. V., 1971: Budget of Calcium Carbonate, Southern California Continental Borderland. – J. Sed. Pet., 41/3, 798–808, 2 Figs.
- STOCKMANN, R. W., GINSBURG, R. N. & E. A. SHINN, 1967: The Production of Lime Mud by Algae in South Florida. – J. Sed. Pet., 37, 633–648.
- VAN ANDEL, Tj. H. & VEEVERS, J. J., 1967: Morphology and Sediments of the Timor Sea. – Australia Bureau Mineral Resources, Geol. and Geophys. Bull. 83, 173 S., Abb., Tab., Karten, Tafeln.
- VAN STRAATEN, L. M. J. U., 1965: Sedimentation in the North-Western Part of the Adriatic Sea. – In: W. F. Whittard & R. Bradshaw (edits): Submarine Geology and Geophysics. Colston Papers Nr. 17, (Butterworths). S. 143–162, Fig. 60–68.
- WEFER, G., 1972: Wellenrippeln vor Bokniseck, Eckernförder Bucht, Westliche Ostsee (Tauchuntersuchung). – Unveröff. Dipl. Arb., Geol. Paläont. Inst. Univ. Kiel.
- ZANKL, H., 1972: Interaction of Genetic Processes in Holocene Reefs off North Eleuthera Island, Bahamas. – Geol. Rdsch., 61/2, 520–541.
- ZIEGENBEIN, J., 1966: Trübungsmessungen im Persischen Golf und im Golf von Oman. – „Meteor“ Forsch. Erg. Reihe A, 1, 59–79, 15 Abb.