

Copyright ©

Es gilt deutsches Urheberrecht.

Die Schrift darf zum eigenen Gebrauch kostenfrei heruntergeladen, konsumiert, gespeichert oder ausgedruckt, aber nicht im Internet bereitgestellt oder an Außenstehende weitergegeben werden ohne die schriftliche Einwilligung des Urheberrechtinhabers. Es ist nicht gestattet, Kopien oder gedruckte Fassungen der freien Onlineversion zu veräußern.

German copyright law applies.

The work or content may be downloaded, consumed, stored or printed for your own use but it may not be distributed via the internet or passed on to external parties without the formal permission of the copyright holders. It is prohibited to take money for copies or printed versions of the free online version.

Korrekturen:

Kieler Meeresforschungen Sonderheft Nr. 3, 1976

S. 31 (WORTHMANN), Zeile 6: „zu betrachten“ Folgende zwei Absätze, beginnend mit „(Wasser)bezirke bis Faktor auftritt“. direkt ansetzen an das Ende der Seite „Stillwasser“

S. 99 (REIMERS/KÖLMEL), Zeile 5 von unten: statt 21,4 = 26,4

S. 84/85 RICHTER/RUMOHR Tafel 2 Abb. 3 steht auf dem Kopf.

S. 1–4 SCHRAMM/MARTENS Legenden zu Abb. 2–4 vertauscht.

Beiträge des Sediments zum Stoffumsatz in der Kieler Bucht I. Salzgehaltsschwankungen im oberflächennahen Porenwasser und der Austausch zwischen Interstitial und Bodenwasser*)

VON TEKLA REIMERS UND REINHARD KÖLMEL

Zusammenfassung: Der Salzgehalt der Wassersäule und des Porenwassers in 2—5 cm und 8—12 cm Sedimenttiefe wurden von Juni 1972 bis Oktober 1973 monatlich auf drei Stationen der Kieler Bucht bestimmt. An Hand der Salzgehaltsveränderungen in Sediment und Bodenwasser wird der Austausch des Porenwassers untersucht.

In den beiden ufernahen, in Förden gelegenen Stationen nimmt der Salzgehalt wenige Zentimeter unterhalb der Sedimentoberfläche rasch ab. Dies wird auf Grundwassereinflüsse in den unter dem Meeresboden liegenden Sedimentschichten zurückgeführt. Die Lage der Grenzfläche Meer-/Grundwasser verändert sich mehrmals im Jahr. Dabei verursacht sie einen Verdrängungsaustausch des Porenwassers.

Die dritte Station, Eckernförder Bucht/Rinne ist typisch für die Tiefengebiete der Kieler Bucht. Hier steht der Salzgehalt des oberflächennahen Interstitials in enger Beziehung zu dem des Tiefenwassers. Die Auswirkungen des Einstroms salzreichen Kattegatwassers im Sommer 1972 auf die Salzgehalte des Interstitials werden dargestellt. Ein Ansteigen der Salinität war bis in 10 cm Sedimenttiefe festzustellen. Annähernd gleiche Zeiten für Zu- und Abnahme der Porenwassersalinität im Gefolge des Tiefenwassereinstroms schließen einen Verdrängungsaustausch durch spezifisch schweres Wasser hier aus. Die bioturbate Aktivität im Sediment der Eckernförder Bucht/Rinne wird dargestellt und ihr Einfluß auf die Austauschvorgänge zwischen Interstitial und Tiefenwasser erörtert.

Für den Stofftransport werden die Alternativen des Austausches durch Diffusion von Ionen und durch Vermischen von Lösungen diskutiert. Der Bezug zu den untersuchten Sedimenten und den Auswirkungen auf die Wassersäule wird hergestellt.

Contributions of the sediment to decomposition and production in Kiel Bight. I. Variability of salinity in the near-surface pore water and the exchange between interstitial and bottom water (Summary): Salinity of the water body and the pore water was determined monthly at 3 different stations of Kiel Bight. In the near-surface sediment layers from 2—5 and 8—12 cm depth were examined for an annual cycle from June 1972 to October 1973. Variability of salinity is supposed to indicate exchanges between interstitial and bottom water.

In the sediments of the two Fjord stations salinity declines rapidly only a few centimeters below the sediment surface. This effect is supposed to be caused by interaction of ground water from underlying sediment layers. The position of the sea water/ground water interface changes during the annual cycle. This might cause a displacement exchange of the interstitial water.

The third station is Eckernförde Bight. It resembles very much the situation of sediment and water body dynamics which is typical for the deeper parts of Kiel Bight. Salinity of the near-surface interstitial water is closely related to the overlying water body. The influence of an inflow of salty Kattegat water in 1972 is demonstrated. An increase of salinity was found down to 10 cm below the sediment surface. Following the sea water inflow it was observed that the time interval for pore water salinity increase and decrease was approximately the same. Consequently no gravity displacement by the salty bottom water takes place within this sediment. Frequency of organisms causing bioturbidity in the sediment of Eckernförde Bight is graphed. Its influence on the exchange between interstitial and bottom water is discussed.

Exchange by diffusion of ions and mixing of solutions are discussed as alternatives of mass transport. Quality and amount of this exchange is related to the analysed sediments and its contributions to the overlying water body.

*) Beitrag Nr. 144 aus dem Sonderforschungsbereich 95, Universität Kiel

Einleitung

In Küstennähe nimmt die Bedeutung des Meeresbodens für die Remineralisierung der Nährstoffe zu. Ein wachsender Teil der abgestorbenen organischen Substanz wird mit der Verkürzung der Wassersäule am und im Sediment zersetzt. Die Phytoplanktonproduktion wird in hohem Maße abhängig von der Rückführung der Nährstoffe. Dies konnten v. BODUNGEN et al. (1974) für die Kieler Bucht zeigen.

Die größte Abbauproduktivität des Meeresbodens liegt meist unmittelbar an der Sedimentoberfläche. Im Weichboden werden hier die höchsten Zahlen von Bakterien, Ciliaten und Nematoden gefunden (GUNKEL und RHEINHEIMER, aus RHEINHEIMER 1971, REIMERS 1976, KÖLMEL 1976). Von der Sedimentoberfläche geraten die freigesetzten Nährstoffe leicht wieder zurück in die Wassersäule. Ein Teil der Abbauprozesse findet unterhalb der Sedimentoberfläche statt (SUESS 1967b). Die Nährstoffe gelangen dabei ins Porenwasser, von wo ihr Rücktransport in die Wassersäule behindert wird.

Mangelhafte Sauerstoffversorgung des Sediments beeinträchtigt die Zersetzung der organischen Substanz. Unter anoxischen Bedingungen werden verstärkt Nährstoffe im Wasser und im Interstitial angereichert (RICHARDS 1965). In den Rinnen der Kieler Bucht führen die Stagnation des Tiefenwasseraustausches und die Ausbildung einer thermohalinen Sprungschicht während der Sommermonate zu anoxischen Verhältnissen im Bodenwasser und im Sediment. Bei einer hohen Sedimentationsrate der organischen Substanz bildet sich auch in den flacheren Fördegebieten zeitweise ein anoxisches Milieu schon an der Sedimentoberfläche (REIMERS 1976).

Wesentliche Elemente des Abbaus der organischen Substanz wurden im Zusammenhang mit den abiotischen Voraussetzungen im Sediment und den darauf existierenden Biozoosen an drei Stationen der Kieler Bucht von 1972–1974 untersucht. Bei zwei Stationen war die Oberfläche zeitweise anoxisch. Von den untersuchten Stationen entsprechen zwei dem besonderen Charakter der Förden, die dritte ist typisch für die weiten Tiefengebiete der Kieler Bucht. In der vorliegenden Arbeit analysieren wir die Salzgehaltsveränderungen im Porenwasser nahe der Sedimentoberfläche an drei Stationen und ihre Wechselwirkung mit dem Bodenwasser. Die Veröffentlichung weiterer Ergebnisse wird vorbereitet.

Material und Methode

Die Lage der Stationen geht aus Abb. 1 hervor. Die Station Eckernförder Bucht/Rinne (28 m) liegt im Rinnensystem der westlichen Kieler Bucht. Hier wird ein periodischer Einstrom von salzreichem Tiefenwasser aus dem Kattegat wirksam. Die Station Eckernförder Bucht/Hafen (8 m) befindet sich in der Einfahrt zum Eckernförder Hafen. Das Sediment liegt dort ebenso wie auf der Station Kieler Förde/Schwentinemündung (9 m) im Bereich des Oberflächenwasserkörpers der Ostsee. In Tabelle I geben wir einen kurzen Überblick über die hier interessierenden Eigenschaften der Sedimente. Weitere Angaben zu den in Tabelle I aufgeführten Daten finden sich bei KÖLMEL (1976).

Salzgehalt und Temperatur der Wassersäule wurden monatlich in situ bestimmt mit der Temperatur-Salzgehaltssonde der Fa. Electronic Switchgear, London. Der für Salzgehaltsmessungen zwischen 0–32‰ angegebene Fehler beträgt $\pm 0,1^0/_{00}$. Mehrfache Vergleichsmessungen mit dem Salinometer ergaben eine Standardabweichung von $\pm 0,2^0/_{00}$. Auch der Salzgehalt des Porenwassers wurde im Labor mit der T/S-Sonde gemessen. Bei dem benutzten Modell befanden sich Kohleelektroden und Thermistor im gleichen Hohlraum des Meßkopfes. Bei Angleichung an die Raumtemperatur lag die

Tabelle I
Eigenschaften der Sedimente

| Station | Korngröße | Wassergehalt | | Glühverlust | |
|---|---|----------------------|---------------|--------------------------|---------------|
| | Mittlerer Durchmesser der Körner (md 50) in μm | in % des Naßgewichts | | in % des Trockengewichts | |
| | Sedimenttiefe | Sedimenttiefe | | Sedimenttiefe | |
| | 0—15 cm | 0—2 cm (Max.) | 2—9 cm (Min.) | 0—2 cm (Max.) | 2—9 cm (Min.) |
| Eckernförder Bucht/Rinne . . . | 9—15 | 74 | — 68 | 15,9 | — 11,0 |
| Eckernförder Bucht/Hafen . . . | 27—125 | 37—60 | 54—64 | 3,0—11,1 | 7,7—11,7 |
| Kieler Förde/Schwentine- mündung | 13—25 | 81 | — 69 | 20,8 | — 14,5 |

Reproduzierbarkeit der Messungen im angegebenen Fehlerbereich. Die Temperatur wurde unmittelbar nach der Probennahme in der Mitte des Sedimentkerns mit einem Quecksilberthermometer bestimmt (Genauigkeit $\pm 0,1$ °C).

Das für die Salzgehaltsbestimmung benutzte Sediment wurde mit einem abgewandelten Kastengreifer gewonnen (REINECK 1963), der die Sedimentoberfläche besonders schonend (KÖLMEL 1976). Sofort nach Entnahme des Kerns wurden zwei Sedimentschichten aus meist 2—5 cm und 8—10 bzw. 10—12 cm Sedimenttiefe abgetrennt und in luftdichte Gefäße gefüllt. Im Labor wurden je 250 ml Sediment zentrifugiert und das überstehende Porenwasser für die Salzgehaltsbestimmung benutzt.

Ergebnisse

1. Monatliche Veränderungen der Salzgehalte im Porenwasser

Eckernförder Bucht/Rinne. Im Sommer und Herbst 1972 führt ein starker Einstrom salzreichen Kattegatwassers zu 10—12 cm tief ins Sediment reichenden Veränderungen des Salzgehaltes (Abb. 2). Der Salzwassereinstrom 1973 zeigt ähnliche Ergebnisse. Er ist jedoch kürzer und weniger salzreich. Seine Wirkung ist daher gering und mehr auf die unmittelbar an der Oberfläche liegenden Sedimentschichten beschränkt. Im Winter 1972/73 kommt es nicht zu einem Ausgleich der Salzgehalte in Wassersäule und Sediment. Im Januar 1972 haben wir gleiche Salzgehaltswerte in der gesamten Wassersäule und bis in 10 cm Sedimenttiefe gefunden.

Eckernförder Bucht/Hafen. Während der meisten Monate des Jahres dringt salzarmes, fast süßes Wasser aus tieferen Sedimentschichten bis unmittelbar an die Sedimentoberfläche vor (Abb. 3). Das brackig-süße Wasser schiebt sich im Frühjahr 1973 weiter vor, als im Herbst 1972. Höhere Salzkonzentrationen, die an die Wassersäule angeglichen sind, befinden sich nur im Winter 1972/73 und in den Sommermonaten der beiden Jahre in den oberen Zentimetern des Sediments.

Kieler Förde/Schwentine-mündung. Die Salinität des Porenwassers steht meist in enger Beziehung zum Tiefenwasser (Abb. 4). Aus tieferen Sedimentschichten aufsteigendes Wasser mit geringen Salzgehalten finden wir nur zu Anfang des Jahres und im

Tafel 1 (zu T. REIMERS, R. KÖLMEL)

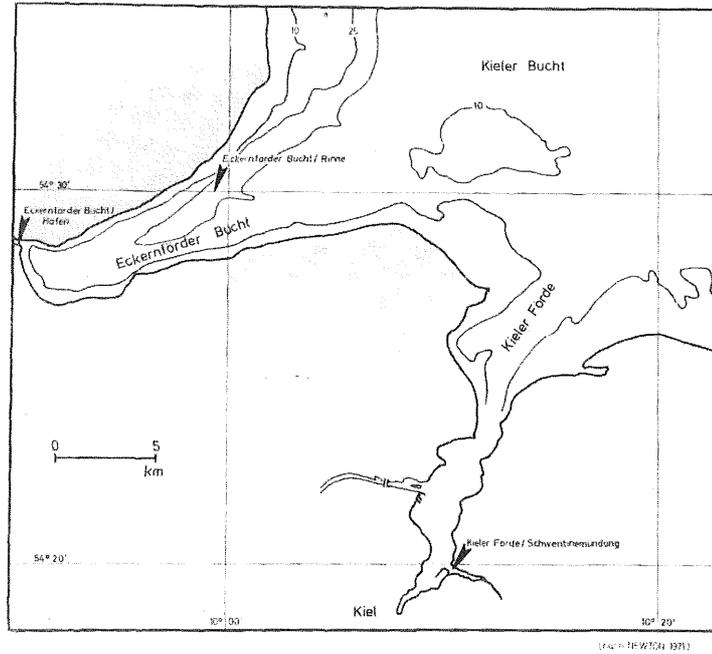


Abb. 1: Die Lage der drei Stationen in der Kieler Bucht mit der 10 m und 25 m Tiefenlinie.

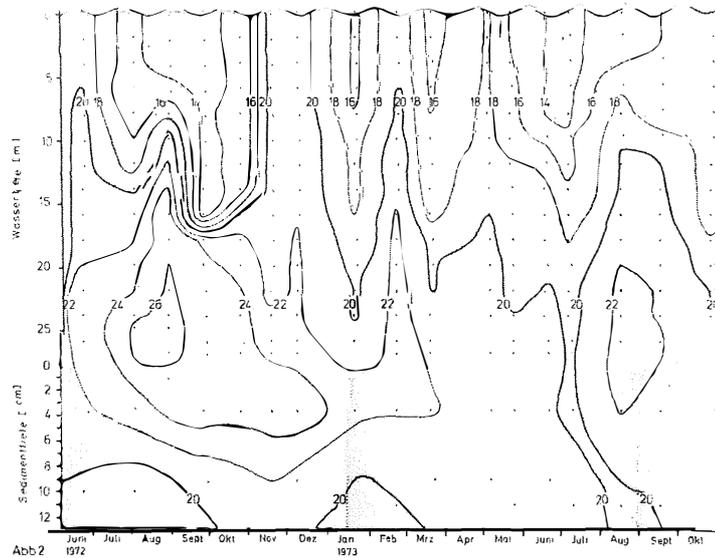


Abb. 2: Jahresgang der Isohalinen in der Wassersäule und im oberflächennahen Sediment der Eckernförder Bucht/Rinne.

Tafel 2 (zu T. REIMERS, R. KÖLMEL)

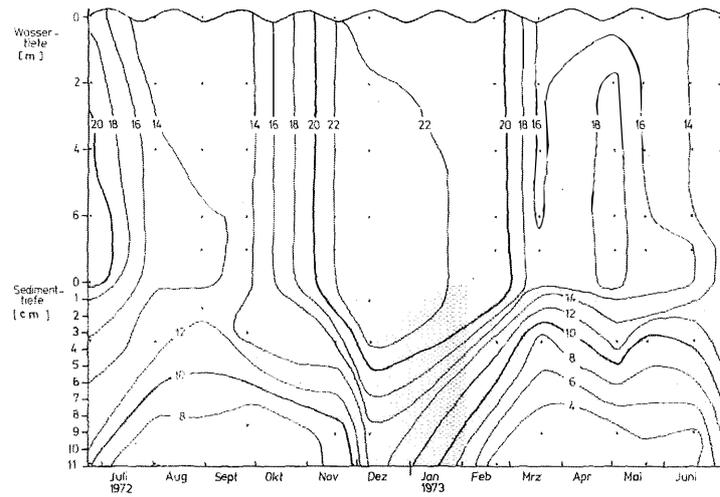


Abb. 3: Jahresgang der Isohalinen in der Wassersäule und im oberflächennahen Sediment der Eckernförder Bucht/Hafen.

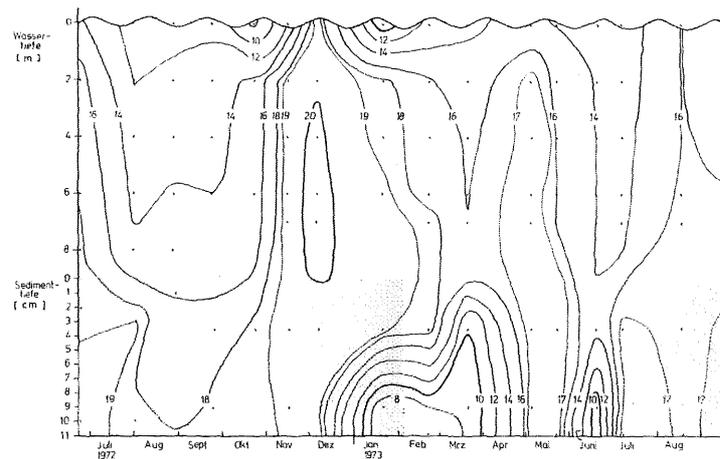


Abb. 4: Jahresgang der Isohalinen in der Wassersäule und im oberflächennahen Sediment der Kieler Förde/Schwentinemündung.

Juni 1973. Dabei dringt dieses Wasser im März ähnlich wie im gleichen Monat in der Eckernförder Bucht/Hafen bis an die Sedimentoberfläche vor. Im Vergleich mit dieser Station wurde das salzarme Wasser in der Schwentinemündung weniger häufig und unregelmäßig gefunden.

2. Unterschiede zwischen den Sedimenten

Wenn man die gemessenen Salzgehalte miteinander vergleicht, zeigen sich folgende Abweichungen der Sedimente voneinander. Im Porenwasser der Eckernförder Bucht/Rinne betragen in allen Sedimenttiefen die niedrigsten Salzgehalte $18-20\text{‰}$. Sie liegen damit in der gleichen Größenordnung, wie unsere Meßergebnisse zwischen 1971 und 1974 für das winterliche Tiefenwasser dort. Dagegen wurde im Porenwasser der Kieler Förde/Schwentinemündung das Minimum der Salinität mit $5-8\text{‰}$ bestimmt. Dieser Salzgehalt trat nur in 8–12 cm Sedimenttiefe auf. Gleichzeitig wurden im Tiefenwasser über 19‰ gemessen. Die geringsten Salzgehaltswerte wurden zeitweise in der Eckernförder Bucht/Hafen in 8–12 cm Sedimenttiefe mit $2-4\text{‰}$ S angetroffen, bei 16 bis 19‰ im Tiefenwasser.

Größere Veränderungen in der Salinität des Porenwassers gingen in der Eckernförder Bucht/Rinne vom Tiefenwasser bzw. der Sedimentoberfläche aus. Sie machten sich in 2–5 cm Sedimenttiefe stärker bemerkbar, als in der darunter liegenden Schicht. An den beiden anderen Stationen tritt dagegen zeitweise ein hohes Konzentrationsgefälle im Verhältnis der 2–5 cm Tiefe zum Tiefenwasser, wie auch von der 2–5 cm zur 8 bis 10 cm Schicht auf. Die Stationen weichen also sowohl voneinander ab in der absoluten Höhe ihrer minimalen interstitiellen Salinitätswerte, als auch in deren räumlicher Anordnung im Verhältnis zur Sedimentoberfläche.

Weiter können wir feststellen, daß die maximalen Salzgehaltsdifferenzen zwischen den beiden untersuchten Sedimenttiefen im Porenwasser der Eckernförder Bucht/Rinne $4-5\text{‰}$ betragen. Diese Maximalwerte treten im Sommer 1972 zu Beginn und gegen Ende des Kattegatwassereinstroms im Tiefenwasser auf. In der Kieler Förde/Schwentinemündung treten die größten interstitiellen Salzgehaltsunterschiede mit $7-13\text{‰}$ Anfang 1973 auf. Die Salzgehaltsabnahme, auf Grund derer sich das Konzentrationsgefälle bildet, erfolgt jedoch in der unteren Sedimentschicht. Ein ähnlich großes Gefälle ergibt sich zeitlich zwischen den Monaten April und Juni. Dabei dringt salzreiches Wasser über den Meßbereich hinweg ins Sediment ein. In der Eckernförder Bucht/Hafen liegen die maximalen Salinitätsunterschiede zwischen den beiden Schichten bei $8-11\text{‰}$ S.

Aus den dargestellten absoluten und räumlichen Differenzen der Meßwerte sind zwei Quellen für die Salzgehaltsänderungen im oberflächennahen Porenwasser zu erkennen: a. wechselnde Salzgehalte im Tiefenwasser und b. eine Wechselwirkung mit Grundwasservorkommen.

3. Auswirkungen des Einstroms von Kattegatwasser 1972 auf die Salzgehalte im Interstitial der Eckernförder Bucht/Rinne.

Aus Abb. 5 ist ersichtlich, daß bis zum September die Salinität des Tiefenwassers höher war (max. 3‰ S), als die des Porenwassers in 2–5 cm Sedimenttiefe. Das Tiefenwasser erreicht seinen höchsten Salzgehalt mit $21,4\text{‰}$ im August. Etwa drei Monate später, im November konnten wir in 8–10 cm Sedimenttiefe ein Maximum mit $22,1\text{‰}$ S messen. Im Oktober tritt eine Umkehr der Konzentrationsgradienten ein. Wir finden nun nahe der Sedimentoberfläche in 2–5 cm Sedimenttiefe eine höhere Salinität (max. 3‰ S), als im Tiefenwasser.

Austauschelemente. Wenn wir hypothetisch für das Eindringen des salzreichen Tiefenwassers in das Sediment im Sommer 1972 eine Verdrängung des Porenwassers durch spezifisch schwereres Wasser (Turbulenzen) als Transportmechanismus annehmen, dann ist aus Abb. 5 zu entnehmen, mit welcher Geschwindigkeit die Salzkonzentrationen im Porenraum zunehmen, wenn über einen längeren Zeitraum eine erhöhte Salinität im Tiefenwasser gemessen wird. Nachdem das spezifisch schwere Wasser in das Sediment eingedrungen ist, wäre für den Austritt der erhöhten Salzkonzentrationen aus dem Interstitial ins Bodenwasser (September bis Januar) einer geringeren Geschwindigkeit, d. h. ein bedeutend längerer Zeitraum zu erwarten. Tatsächlich wurde aber beim Austritt der Salze aus dem Porenwasser eine wenigstens ebenso rasche Konzentrationsverminderung gefunden (Abb. 5 (b)), wie vorher bei der Erhöhung der Salzgehalte in 2–5 cm Sedimenttiefe (Abb. 5 (a)).

Die zeitliche Verschiebung der gemessenen Salzgehalte im Tiefenwasser und in den beiden Sedimentschichten (Abb. 5) ist das Resultat der räumlichen Anordnung der gemessenen Horizonte. Zwischen ihnen befinden sich jeweils nicht analysierte Sedimentschichten. Bei der Analyse der Zeitdauer, die der Konzentrationsausgleich der Salzgehalte in Anspruch nimmt, ist zu berücksichtigen, daß vor dem Juni 1972 bereits salzreiches Wasser über dem Sediment gelegen hat, das im Mai kurzfristig ausgetauscht worden war. Auch können wir insbesondere für 1973 nicht erwarten, daß durch unsere Messungen jede kurzfristige Salzgehaltsschwankung im Bodenwasser erfaßt wurde.

Bioturbation und Bioturbulenz. Von Juni bis August 1972 ist die Makrofauna mit 3000 bis 540 Individ. \times m⁻² sehr zahlreich. Jedoch werden im Juni 70% der Individuen von wenige Millimeter großen juvenilen *Abra alba* repräsentiert. Die kleinen Muscheln leben einige Millimeter tief in das Sediment eingegraben und stehen durch ihren Siphon in Kontakt mit dem über dem Sediment befindlichen Tiefenwasser. Der häufigste im Sediment grabende Organismus ist der Polychaet *Pectinaria koereni* mit 90–200 Individ. \times m⁻². Von den im Sediment lebenden und Gänge bauenden Polychaeten wie *Capitella capitata*, werden nur noch wenige Tiere gefangen, obwohl sie im Frühjahr 1972 sehr zahlreich waren. Im Gefolge mehrwöchiger anoxischer Bedingungen stirbt die Makrofauna von September–Dezember 1972 im Sediment aus. Nach der Wiederbesiedlung bleiben 1973 die Individuenzahlen gegenüber Frühjahr und Sommer 1972 verschwindend gering (Abb. 6).

Die aktive Erzeugung von Strömungen im oberflächennahen Sediment durch diese Makrobenthosfauna (Bioturbulenzen) ist, soweit überhaupt vorhanden, auf den Zeitraum Juni–August 1972 beschränkt. Aber auch in diesen Monaten ist ein Austausch durch die Organismen nicht großflächig wirksam oder in mehr als 1–3 cm Sedimenttiefe von Bedeutung, da die hierfür wirksamen Organismen fehlen.

Die Fauna beeinflusst die Sedimentstruktur durch die Umlagerung des Sediments (Bioturbation). Dies geschieht einmal durch die im Sediment verankerten Organismen, wie *Abra alba*, aber auch durch verlassene Röhren, Kotpillenanhäufungen etc. Der Anteil der Kotpillen im Sediment der Eckernförder Bucht/Rinne ist zwischen Juni 1972 und Oktober 1973 mit abnehmend 40–15% des Trockengewichts relativ groß (KÖLMEL 1976).

Im Mikrobereich verändert eine Gruppe der Meiofauna durch die Bildung haarfeiner Gänge die Sedimentstruktur. Die Nematoden: 0,7–0,2 mm lang und 20–70 μ m breit. In der Eckernförder Bucht/Rinne wurden 20–200 Individ. \times cm⁻³ an der Sedimentoberfläche und 1–28 Individ. \times cm⁻³ in 5–9 cm Sedimenttiefe gefunden. Die Individuenzahlen in den Sedimentschichten und je Flächeneinheit sind trotz großer

Tafel 3 (zu T. REIMERS, R. KÖLMEL)

Eckernförder Bucht / Rinne (28m)

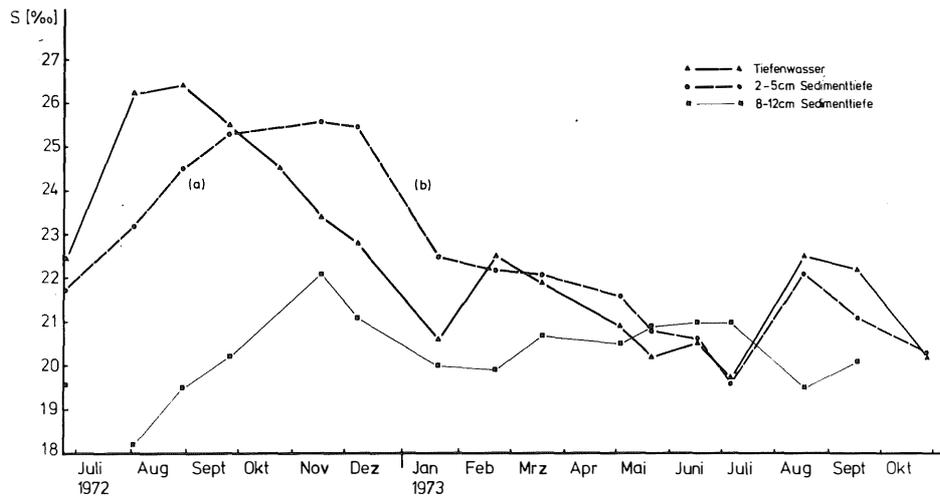


Abb. 5: Veränderung der Salzgehalte 1972/73 im Tiefenwasser und in den beiden untersuchten Sedimentschichten der Eckernförder Bucht/Rinne.

Eckernförder Bucht / Rinne (28m)

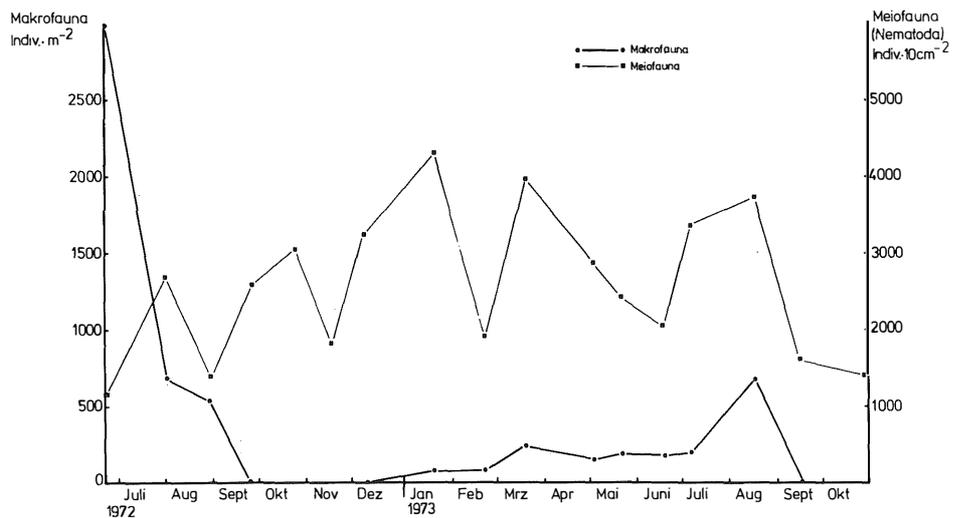


Abb. 6: Die Individuenzahlen der Makro- und Meiofauna (Nematoda) 1972/73 in der Eckernförder Bucht/Rinne.

Tafel 4 (zu T. REIMERS, R. KÖLMEL)

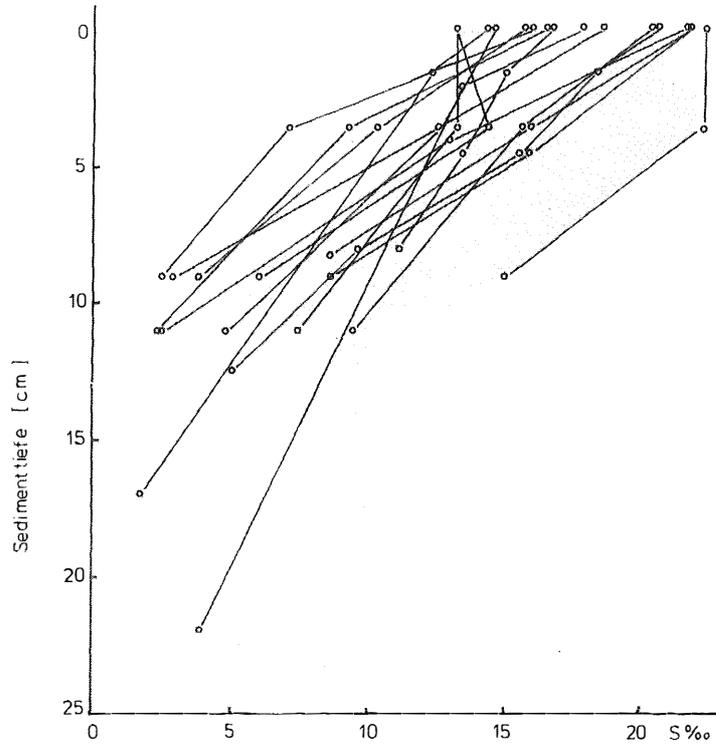


Abb. 7: Die Salzgehaltsgradienten im Sediment der Eckernförder Bucht/Hafen.

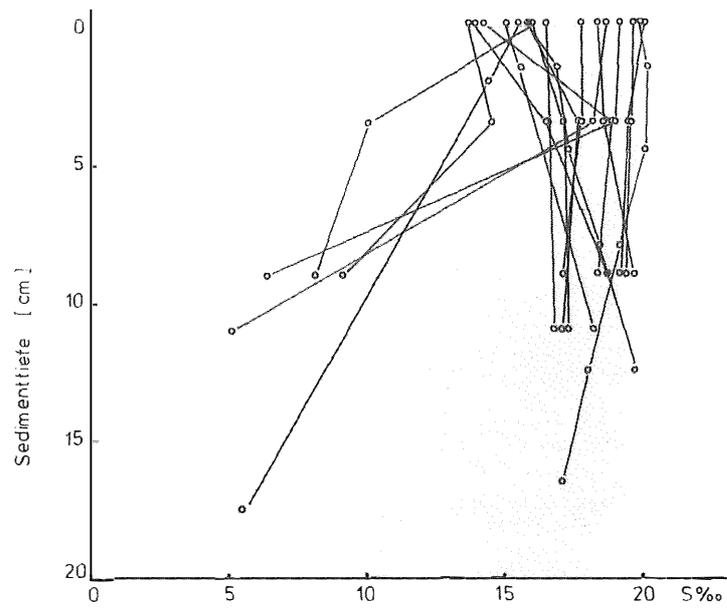


Abb. 8: Die Salzgehaltsgradienten im Sediment der Kieler Förde/Schwentinmündung.

Schwankungen im Durchschnitt relativ hoch (Abb. 6). Die größeren Tiere sind besonders in 2–9 cm Sedimenttiefe häufig.

4. Die Verdrängung des Porenwassers durch Grundwasser

Verdrängungsaustausch. Der Salzgehaltsgradient verhält sich Anfang 1973 in beiden Fördersedimenten ähnlich beim Absinken der Salzgehalte in 2–5 cm Tiefe. In dieser Sedimentschicht fällt der Salzgehalt in der Kieler Förde/Schwentinemündung von Januar–März um $9^0/00$ und in der Eckernförder Bucht/Hafen vom Dezember bis März um $15^0/00$. Diese Absenkung der Salzgehalte steht in keiner Beziehung zum Bodenwasser, sondern ist aus dem Aufsteigen des in 8–10 cm Tiefe gemessenen salzarmen Wassers zu verstehen. Dabei wirken Austauschmechanismen dem Vordringen der Grundwasserfront zur Sedimentoberfläche entgegen.

Die inverse Schichtung von salzarmem Wasser unter salzreiches, spezifisch schweres Wasser ist für sich genommen extrem instabil. Durch das Auftreten von Turbulenzen müßte sie sofort beseitigt werden. Es sei denn, die Schichtung wird laufend wieder hergestellt (vgl. unten) und/oder Turbulenzen bilden sich nicht. In der Eckernförder Bucht/Hafen messen wir innerhalb von zwei Jahren einen maximalen Gradienten zwischen der 2 bis 5 cm und 8–10 cm Schicht von $8^0/00$. Er liegt deutlich unter den für die Kieler Förde/Schwentinemündung beobachteten maximal $12–13^0/00$. Der Unterschied zwischen den Gradienten resultiert vermutlich aus einem unterschiedlichen Austauschverhalten der Lösungen an der Grenzfläche Meer/Grundwasser in beiden Sedimenten. Der kleinere Gradient in der Eckernförder Bucht/Hafen könnte dann als Folge schnelleren Austausches — möglicherweise unter Bildung von Turbulenzen — interpretiert werden (vgl. Korngrößen in Tabelle I).

Der Gradient, der durch das Aufsteigen des Grundwassers im Sediment entsteht, hängt vom Verhalten der beiden verschiedenen salzreichen Lösungen im Kapillarraum ab. Dieses Verhalten ist bei Flüssigkeiten, die einander verdrängen, in hohem Maße durch die Viskosität der Flüssigkeiten bedingt. Wenn die Lösungen von gleicher oder annähernd gleicher Viskosität sind, hat die Vermischungszone die kleinste Ausdehnung und die Verdrängung ist optimal (v. ENGELHARDT 1960). Dies trifft für Salz- und Süßwasser zu. Die beobachteten Verschiebungen des Konzentrationsgefälles indizieren daher ein Ausdrücken oder Einsaugen des Interstitialwassers. Der Verdrängungseffekt zwischen den verschieden salzreichen Lösungen wird überlagert durch den Diffusionstransport an der Grenzfläche der Flüssigkeiten (v. ENGELHARDT 1960).

Verdrängungshub. In den Abbildungen 7, 8 haben wir die höchsten und die niedrigsten Konzentrationsgradienten aus beiden Sedimenten aufgetragen. Die Meßdaten umfassen einschließlich der Einzelbeobachtungen einen Zeitraum von über zwei Jahren. Wenn wir diese Gradienten in die tieferen Sedimentschichten verlängern (Raster), erhalten wir einen Anhaltspunkt für die Tiefen, innerhalb derer die Grenzfläche Meer/Grundwasser oszilliert.

In der Eckernförder Bucht/Hafen bewegt sich die Grundwasserfront zwischen etwa 10–30 cm Sedimenttiefe (Abb. 7). Dieser Tiefenhub erscheint sehr gering. Es wurden aber in allen untersuchten Kernen zur Sedimentoberfläche hin ansteigende Salzgehaltsgradienten beobachtet. Diese Gradienten bleiben nur erhalten, wenn immer wieder neues salzarmes Wasser aus tieferen Sedimentschichten aufsteigt. Die Geschwindigkeit dieses Flusses wechselt. Nur in wenigen Monaten (Dezember 1972, Juli 1973) sind Anzeichen für einen Stillstand oder Rückgang zu erkennen.

In der Kieler Förde/Schwentinemündung steigt die Grenzfläche Meer/Grundwasser nur Anfang 1973 auf eine obere Schichttiefe von ca. 10 cm (Abb. 8). Eine Sedimenttiefe, bis zu der sich die Grundwasserfront zurückzieht, läßt sich nicht bestimmen — möglicherweise liegt sie im Meterbereich. Messungen bis in 10—15 cm Sedimenttiefe ergeben, daß die Salzgehaltsänderung zeitweise sehr gering ist, oder sogar mit der gemessenen Sedimenttiefe die Salinität noch ansteigt.

Diskussion

Für den Transport der Stoffe zwischen Interstitial und Tiefenwasser stehen im Sediment zwei alternative Wege zur Verfügung: a. Es diffundieren die Ionen in Abhängigkeit vom Konzentrationsgefälle von einer Lösung in eine andere (BERNER 1971). b. Die Lösungen selbst werden transportiert und vermischt.

Für die Eckernförder Bucht/Rinne konnten wir zeigen, daß ein Austausch der Porenlösungen durch spezifisch schwereres Bodenwasser nicht stattfindet und strömungserzeugende Organismen ohne Bedeutung sind. Das vorliegende Material erlaubt keine Erklärung der Salzgehaltsveränderungen im Interstitial ausschließlich aus der Cl^- -Diffusion, z.B. weil es nicht alle Einflüsse, etwa tiefliegendes Grundwasser, erfaßt.

Der für die Eckernförder Bucht/Rinne beschriebene Austausch des oberflächennahen Porenwassers mit dem Bodenwasser und der winterliche Konzentrationsausgleich geben ein Bild der aktuellen Einflußzone des Tiefenwassersalzgehaltes auf die Salinitätsänderungen im Sediment. Bei zunehmenden Sedimenttiefen scheinen sich Konzentrationen an der Sedimentoberfläche nur im Verlauf mehrerer Jahre auszuwirken. In der Ostsee nimmt die Cl^- -Konzentration in den gebänderten Tonen mit der Tiefe ab. In den marinen Schlickten bleiben dagegen die Cl^- -Gehalte mit wachsender Sedimenttiefe konstant. Leichte Abweichungen wurden in den mit wechselnd salzigem Wasser gefüllten Ostseesenken festgestellt. Im Bornholm Becken und im Gotlandtief konnten in geringer Sedimenttiefe leicht erhöhte Cl^- -Gehalte gegenüber dem darüber liegenden Sediment und dem Bodenwasser gemessen werden (HARTMANN 1964, SUESS 1976a).

RIEDL et al. (1972) berichten von einem Mechanismus, bei dem die Porenlösungen selbst transportiert werden ('subtidal pump'). In Sandsedimenten des lotischen Sublitorals fanden sie Strömungen, die durch die Wellenbewegung verursacht wurden. Auf Transport und Vermischung der Porenlösungen mit spezifisch schwerem Bodenwasser ('gravity displacement') wiesen SMETACEK et al. (1976) hin. Die konnten in der Kieler Bucht nach dem Einstrom salzreichen Wassers innerhalb von zwei Tagen das Ergebnis des Porenwasseraustauschs in Form mehrfach höherer Nährstoffkonzentrationen in der Wassersäule messen. Veränderungen im Chemismus des Porenwassers (Harrington Sound/Bermuda) stellten THORSTENSEN and MCKENZIE (1974) in einen Zusammenhang mit dem Absinken der Temperatursprungschicht unter die Sedimentoberfläche und einem dadurch herbeigeführten Austausch zwischen Poren- und Bodenwasser.

Einen Transport der gesamten Porenlösung leistet auch der in den Fördersedimenten vorhandene Verdrängungsaustausch des Porenwassers in Wechselwirkung mit dem unterliegenden Grundwasser. Er wird besonders effektiv durch eine häufigere vertikale Verschiebung der Grenzfläche Meer/Grundwasser im Sediment. Grundwasserführende Sedimentschichten scheinen in tieferen Lagen der Fördersedimente verbreitet zu sein (GROSCHOFF 1937, 1938). Häufigkeit und Ausdehnung, der Sedimente, in denen Grundwasser an die Oberfläche herantritt, sind nicht bekannt. Der von der Wassersäule her verursachte Austausch ist — bei geringer Druckdifferenz — an größeres Sediment

gebunden (RIEDL et al. 1972), während der durch das Grundwasser bewirkte Verdrängungsaustausch auch im sehr feinporigen und hochporösen Sediment der Kieler Förde/Schwentinemündung (Tabelle I) möglich ist.

Die benthische Fauna steht in vielfacher Wechselwirkung mit dem Austausch des Porenwassers. Eine hohe Besiedlungsdichte von grabenden Polychaeten wie *Capitella capitata*, *Scoloplos armiger* u.a. kann in den Rinnen zeitweise ein Faktor für einen durch Organismen beschleunigten Porenwasseraustausch werden vgl. KÜHLMORGEN-HILLE (1965). Auf der Station Eckernförder Bucht/Hafen reichen die Röhren von Arten, die sich über 30 cm tief in das Sediment einbohren, wie z.B. *Nereis diversicolor* u. a. (MUUS 1967), wahrscheinlich bis in die Grundwasser führenden Sedimentschichten. Zur Problematik der an solchen Stellen von den Arten geforderten Salzgehaltstoleranz vgl. REMANE and SCHLIEPER (1971).

Für den Diffusionstransport ist vermutlich die Anreicherung des Sediments mit Lücken, Gängen usw. im Mikrobereich beschleunigend wirksam. Die Packungsdichte des Sediments ist nahe der Sedimentoberfläche nicht einheitlich. Die Sedimentstruktur wird verändert durch die Ergebnisse der bioturbaten Aktivität der Makrofauna (Faeces, Pseudofaeces u. a.), wie durch die Existenz der sich stemmschlängeld und ungerichtet im Sediment fortbewegenden Nematoden (CULLEN 1973). Die sekundäre Sedimentstruktur und der Wassergehalt des Sediments gehen über die Porosität in die Diffusionsgeschwindigkeit der Ionen ein.

Die Gesamtheit des Porenwasseraustausches im oberflächennahen Sediment wird, wie angedeutet, durch einen Komplex von Mechanismen geleistet, die sich wechselseitig in ihrer Wirkung verstärken. Die Verschiedenheit des Stofftransports im Interstitial erörtert auch SUESS (1976a).

Die Bedeutung des Porenwasseraustausches für die organische Produktion in der Wassersäule wächst in den untersuchten Sedimenten mit dem Auftreten anoxischer Bedingungen an der Sedimentoberfläche in den Sommermonaten. Dies ist besonders in der Eckernförder Bucht/Rinne und in der Kieler Bucht/Schwentinemündung der Fall (REIMERS 1976). Die Konzentrationen der Nährstoffe im Porenwasser können dann um das Hundertfache und mehr sein, als in der Wassersäule (SUESS 1976a). Im Tiefenwasser der Rinnen in der Kieler Bucht fand v. BODUNGEN (1975) am Ende der Stagnationsperiode 1972 mehrfach höhere Nährstoffgehalte als zu Anfang des Einstroms salzreichen Wassers. Diese Anreicherung mit Nährstoffen wird auch in den Förden beobachtet. Neben anderen Faktoren leistet wahrscheinlich auch der beschriebene Verdrängungsaustausch des Porenwassers hierzu einen Beitrag.

Literaturverzeichnis

- BERNER, R. A. (1971): Principles of Chemical Sedimentology. McGraw-Hill Co., New York: 240 pp.
- v. BODUNGEN, B., K. v. BRÖCKEL, V. SMETACEK and B. ZEITZSCHEL (1974): Ecological Studies on the Plankton in Kiel Bight. I. Phytoplankton. Merentutkimuslaitoksen Julk./Havsforskningsinstitutes Skrift **239**, 179—186.
- v. BODUNGEN, B. (1975): Der Jahresgang der Nährsalze und der Primärproduktion des Planktons in der Kieler Bucht unter Berücksichtigung der Hydrographie. Dissertation Universität Kiel, 116 S.

- CULLEN, D. J. (1973): Bioturbation of Superficial Marine Sediments by Interstitial Meio-benthos. *Nature* **242**, 323—324.
- v. ENGELHARDT, W. (1960): *Der Porenraum der Sedimente*. Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 201 S.
- GROSCHOFF, P. (1937): Diagenetische Beobachtungen an marinen postglazialen Sedimenten der Kieler Förde. *Geologie der Meere und Binnengewässer* **1**, 279—290.
- GROSCHOFF, P. (1938): Physikalisch-chemische Beobachtungen zur Sedimentdiagenese an Postglazialsedimenten der Eckernförder Bucht. *Geol. Rundschau* **29**: 307—315.
- HARTMANN, M. (1964): Zur Geochemie von Mangang und Eisen in der Ostsee. *Meyniana* **14**, 3—20.
- KÖLMEL, R. (1976): Ökosysteme im Wechsel zur Anaerobiose. Die Entwicklung von Zoobenthos und Abbau in zeitweise anoxischen Biotopen der Kieler Bucht. Diss. Universität Kiel (in Vorbereitung).
- KÜHLMORGEN-HILLE, G. (1965): Qualitative und quantitative Veränderungen der Bodenfauna der Kieler Bucht in den Jahren 1953—1965. *Kieler Meeresforsch.* **21**, 167—191.
- MUUS, B. J. (1967): The Fauna of Danish Estuaries and Lagoons. Distribution and Ecology of Dominating Spezies in the Shallow Reaches of the Mesohaline Zone. *Medd. Danmarks Fisk. Havunders. n. Ser.* **5**, 3—316.
- REIMERS, T. (1976): Anoxische Lebensräume. Struktur und Entwicklung der Mikrobiocenose an der Grenzfläche Meer/Meeresboden. Dissertation Universität Kiel 134 S.
- REINECK, H. E. (1963): Der Kastengreifer. Die Entwicklung eines Gerätes zur Entnahme ungestörter, orientierter Grundproben vom Meeresboden. *Natur und Museum* **93**, 331—336.
- REMANE, A. and C. SCHLIEPER (1971): *Biology of Brackish Water*. *Die Binnengewässer* **25**, 1—372.
- RHEINHEIMER, G. (1971): *Mikrobiologie der Gewässer*. G. Fischer Verlag, Stuttgart, 184 S.
- RICHARDS, F. A. (1965): Anoxic Basins and Fjords. In: RILEY, J. P. and G. Skirrow (eds.): *Chemical Oceanography*, Vol. **1**, 611—145, Academic Press.
- RIEDL, R. J., N. HUANG and R. MACHAN (1972): The subtidal pump: a mechanism of interstitial water exchange by wave action. *Mar. Biol.* **13**, 210—221.
- SMETACEK, V., B. v. BODUNGEN, K. v. BRÖCKEL and B. ZEITZSCHEL (1976): The Plankton-tower. II. Release of Nutrients from Sediments due to Changes in the Density of Bottom Water. *Mar. Biol.* **34**, 373—378.
- SUESS, E. (1976a): Porenlösungen mariner Sedimente — Ihre chemische Zusammensetzung als Ausdruck frühdiagenetischer Vorgänge. Habilitationsschrift Universität Kiel.
- SUESS, E. (1976b): Nutrients near the depositional Interface, 57—79. In: McCave (ed.): *Benthic Boundary Layer*. Plenum Press, New York.
- THORSTENSON, D. C. and F. T. MCKENZIE (1974): Time Variability of Pore Water Chemistry in Recent Carbonate Sediments, Devil's Hole, Harrington Sound, Bermuda. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **38**, 1—19.