

Hydrographische, chemische und mikrobiologische Untersuchungen im Längsprofil der Schlei

Von K. GOCKE, G. RHEINHEIMER und W. SCHRAMM

Die Schlei nimmt unter den Förden der schleswig-holsteinischen Ostseeküste eine Sonderstellung ein. Sie gleicht eher einem Fluß mit endständigen Seen als einer Meeresbucht und ist nur durch eine schmale Öffnung mit der Kieler Bucht verbunden. Diese Eigenschaften wirken sich in starkem Maße auf die Chemie und Biologie aus.

Zum besseren Verständnis der gewonnenen Meßergebnisse werden zunächst die Entstehungsgeschichte sowie die Morphometrie und Hydrographie kurz behandelt. Infolge des begrenzten Wasseraustauschs der Schlei mit der Ostsee haben die hohen Belastungen durch Abwässer von Siedlungen, Industrie und Landwirtschaft bereits frühzeitig zu einer starken Eutrophierung geführt, die erhebliche Veränderungen der Flora und Fauna verursachte. Um diese zu dokumentieren, erfolgten in den Jahren 1965 bis 1968 „Chemische, mikrobiologische und planktologische Untersuchungen in der Schlei im Hinblick auf deren Abwasserbelastung“, die von mehreren Wissenschaftlern des Instituts für Meereskunde an der Universität Kiel durchgeführt und 1970 im Band 26 der „Kieler Meeresforschungen“ veröffentlicht wurden. Seitdem haben die Errichtung und die Erweiterung vorhandener Kläranlagen eine Verringerung der Belastung gebracht.

Die vorliegende Arbeit soll die dadurch eingetretenen Veränderungen der chemischen, mikrobiologischen und botanischen Verhältnisse der Schlei beschreiben. Zusätzlich sollen neue Erkenntnisse über die Mikrobiologie des Gewässers, die durch die Entwicklung und Anwendung neuer Methoden im letzten Jahrzehnt gewonnen wurden, dargestellt werden.

Entstehungsgeschichte

Die vier großen Förden der Kieler Bucht sowie zwei kleinere der Lübecker Bucht, die Trave-Förde und die Hemmelsförde (letztere inzwischen verlandet), bilden ein hervorstechendes Merkmal der schleswig-holsteinischen Ostseeküste und stellen ein beredtes Zeugnis der letzten Eiszeit dar. Sie unterscheiden sich deutlich in ihrer Morphometrie. Die Eckernförder Bucht stellt ein weites offenes Gebilde dar, das mit seiner zungenförmigen Gestalt am besten die hobelnde und pressende Wirkung einer Gletscherzunge der letzten Eiszeit erkennen läßt. Die Flensburger- und die Kieler Förde zeigen in ihren Außenbereichen eine Trichter- oder Trompetenform, weisen jedoch weiter innen gelegene Verengungen auf, die den Wasseraustausch mit der Kieler Bucht erheblich schwieriger machen, als das bei der Eckernförder Bucht der Fall ist.

Ein Blick auf den Atlas läßt erkennen, dass die vierte der großen Ostseeförden, die Schlei, sich grundlegend von den drei anderen Förden unterscheidet. Der unbefangene Betrachter könnte glauben, dass ein endständiges Seenpaar über einen relativ breiten Fluß in die Ostsee entwässert würde. Steht der Betrachter an einer der engen Stellen der Schlei, z.B. in Missunde oder Arnis, so verstärkt sich dieser Eindruck noch, denn häufig lassen sich hier ganz ansehnliche Strömungsgeschwindigkeiten beobachten.

Auch die Schlei ist ein Produkt der Eiszeit. Das weiteste Vordringen des Inlandeises erfolgte bis westlich von Schleswig (DEGN und MUUSS 1966). Die späteren Rückzugsphasen des Eises wurden mehrmals von neuerlichen Vorstößen unterbrochen, die nun nicht mehr in breiter Front, sondern in Form von Gletscherzungen erfolgten. Diese Gletscherzungen folgten bevorzugt den Erosionsrinnen, die sich bereits vorher durch Schmelzwasserströme unter dem Eis in Tunneltälern gebildet hatten. Dabei schufen sie die heutigen breiteren Teile der Schlei. Am äußeren Ende der Gletscherzungen, die bei ihren mehrfachen Vorstößen verschieden weit nach Westen vordrangen, wurden Endmoränenwälle aufgestaut, die quer zu den Schmelzwasserströmen lagen und von diesen durchbrochen werden mussten. Hierdurch wurden schmale, tiefe Einschnitte herauseroziert, die als sog. „Engen“ die weiteren Bereiche der Schlei miteinander verbinden (WIENKER 1997). Die schmalen Stellen vor Missunde und Arnis sind anschauliche Beispiele für diese Engen.

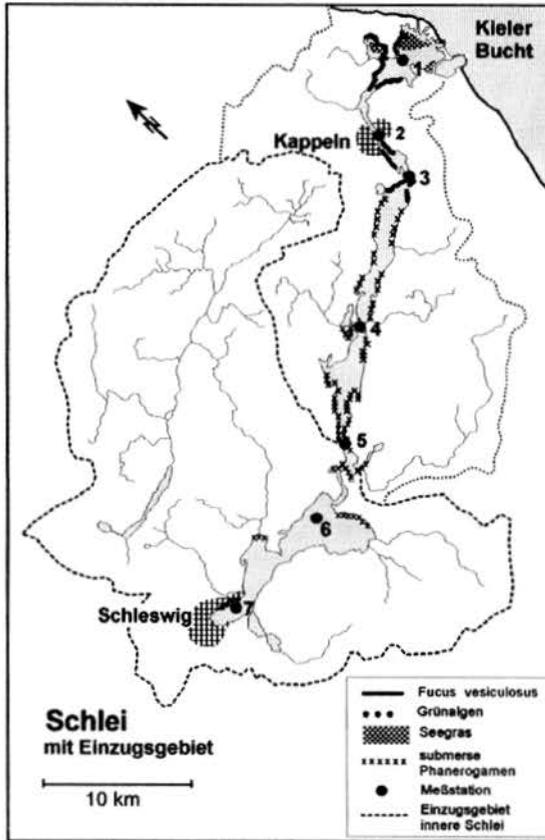
Erst nach dem vollständigen Abtauen des Eises, der folgenden Hebung der skandinavischen Landmassen und der damit verbundenen Senkung der südlichen Randgebiete drang aus der inzwischen entstandenen Ostsee Brackwasser in die langgestreckte Seenkette und formte so um ca. 2000 v. Chr. die Ostseeförde, die wir heute als Schlei kennen (WENDKER, 1990).

Morphometrie und Hydrographie

Die heutige Schlei erstreckt sich als 43 km langer Meeresarm der Kieler Bucht in südwestlicher Richtung weit hinein in das östliche Hügelland Schleswig-Holsteins (Abb. 1). Sie lässt sich nach ihrer Morphometrie in drei Bereiche einteilen: Die „Äußere Schlei“ stellt ein trichterförmiges Gebilde dar, das von der Kieler Bucht durch zwei nehrungsartige Landzungen weitgehend abgetrennt ist und nur über eine ca. 100 m breite, künstlich freigehaltene Durchfahrt mit der Ostsee kommuniziert. Ihre Begrenzung zur „Mittleren Schlei“ bildet die Enge von Arnis. Die Fläche der Äußeren Schlei beträgt 12.8 km² und die mittlere Tiefe ca. 2.5 m. Die „Mittlere Schlei“ als gradliniges und fast perfekt in südwestliche Richtung verlaufendes Teilstück der Schlei hat eine Fläche von 21.1 km² und eine mittlere Tiefe von ebenfalls etwa 2.5 m. Das letzte Stück, die „Innere Schlei“ stellt die bereits erwähnte seenartige Erweiterung der Schlei dar. Ihre Fläche beträgt 19.5 km² und die mittlere Tiefe beläuft sich wiederum auf 2.5 m.

Teilgebiet	Wasserfläche (km ²)	Wasservolumen (10 ⁶ m ³)	Fläche des Einzugsgebietes (km ²)	Süßwasserzulauf (10 ⁶ m ³ /a)
Äußere Schlei	12.8	32	62	29
Mittlere Schlei	21.1	52	165	76
Innere Schlei	19.5	49	440	202
Gesamtgebiet	53.4	133	667	307

Tab. 1: Einige Kenndaten der Schlei
(FEIBICKE 1994, und eigene planimetrische Ermittlungen)



nach Schramm, 1996 (verändert)

Abb. 1: Darstellung des Untersuchungsgebietes. Dargestellt sind die Lage der Stationen und der Makrophytobenthos-Bestände sowie die Einzugsgebiete der gesamten und der inneren Schlei

Das gesamte Einzugsgebiet der Schlei hat eine Fläche von 667 km² mit einem landwirtschaftlichen Nutzungsanteil von ca. 75% (STAT. LANDESAMT SH, 1986). Geschlebelem aus der Weichseleiszeit mit teilweise erhöhtem Sandgehalt ist die vorherrschende Bodenart (WIENKER 1997). Das größte Fließgewässer in diesem Gebiet stellt die Füsinger Au dar, die in die Kleine Breite (Innere Schlei) mündet. Für die Betrachtung des Wasserhaushaltes der Schlei ist es von großer Bedeutung, daß der größte Süßwasserzufluß am landseitigen En-

de der Schlei erfolgt (siehe Tab.1).

Im Einzugsgebiet der Schlei halten sich der auf die Wasserfläche fallende Niederschlag und der Verdunstungsverlust in etwa die Waage. Bei einem Volumen der Inneren Schlei von ca. 49 Mio m³ und einem jährlichen Süßwasserzulauf von ca. 202 Mio m³ (FEIBICKE 1994) würde demnach das Wasser dieses inneren Teiles der Schlei allein durch den Süßwasserzulauf etwa alle 3 Monate einmal ausgetauscht.

Für die beiden anderen Teilgebiete der Schlei wären die aus Zufluß und Wasservolumen berechneten Wassererneuerungszeiten deutlich länger. Natürlich ist die tatsächliche Erneuerungszeit erheblich kürzer, da der Wasseraustausch mit der Ostsee bzw. der Schlei-Teilgebiete untereinander eine große Rolle spielt.

Tidenbedingte Wasserbewegungen sind bei dem nur 10-15 cm betragenden Tidenhub in der Kieler Bucht von untergeordneter Bedeutung für die Schlei und dürften in ihren Auswirkungen auf die Äußere Schlei beschränkt sein.

Die Austauschvorgänge in der Schlei beruhen vielmehr in erster Linie auf Wasserbewegungen, die eine Folge der lokalen Windverhältnisse sind. Im Jahresmittel weht der Wind in Schleswig-Holstein aus WSW (240°) mit einer durchschnittlichen Stärke von 3.8 m/sec. Speziell in der Jahreszeit, in der die stärksten Winde vorherrschen (Oktober - Januar, mittlere Windstärke >6m/sec), kommt der Wind vorwiegend aus westlichen und südwestlichen Richtungen. Stürme und Orkane wehen fast immer aus dem westlichen Sektor (FRANKE 1995). Da die Längsrichtung der Schlei und die Windrichtung gut übereinstimmen, kann der Wind seine maximale Wirkung bezüglich des Wassertransportes voll ausüben. Welche Ausmasse dieser Wassertransport annehmen kann, lässt sich an den zeitweise hohen Strömungsgeschwindigkeiten in den Engen der Schlei erkennen.

Wegen der geringen mittleren Tiefe der Schlei dürften die Wasserbewegungen die vollständige Wassersäule betreffen, d.h. es kommt zu einem Hin- und Herschwingen ganzer Wasserkörper. Nur in den tiefen Gebieten, so z.B. entlang der Fahrrinne, ist die Wassertiefe ausreichend groß zur Bildung eines deutlichen Salzgehaltsgradienten. Hier dürfte ein Ausstrom des Oberflächenwassers von einem Einstrom salzhaltigeren „Tiefenwassers“ begleitet sein.

Längere Phasen ohne Wasserbewegung und ohne die dadurch bedingten Vermischungsvorgänge treten weder im Oberflächen- noch im Tiefenwasser auf. Das lässt sich daraus schließen, dass selbst in der bodennahen Wasserschicht (bis etwa 0.3 m Bodennähe) ganzjährig oxische Verhältnisse vorlagen, eine Beobachtung, die auch für 1967 zutrif (NELLEN & RHEINHEIMER 1970). Die in den anderen Förden beobachteten Erscheinungen, dass ablandige Winde nach längeren Schönwetterphasen zu einem Eindringen von H₂S-haltigem Tiefenwasser in die inneren Bereiche der Förden und zu einem dortigen Aufquellen führen können (EHRHARDT & WENCK 1984), wobei es zu

massivem Fischsterben kommen kann, wurden in der Schlei nicht beobachtet. Dies ist auch kaum zu befürchten, da die Schlei als einzige der vier großen Förden nicht mit dem tiefen Rinnensystem der Kieler Bucht verbunden ist.

Methoden

Die hier dargestellten Ergebnisse sind Teil einer Studie, die von Januar 1991 bis März 1993 durchgeführt wurde. Sie wurden ergänzt durch Untersuchungen vom August 1997 sowie vom Juli und November 1998. Die Proben wurden auf 2-tägigen Fahrten mit dem Forschungskutter „Littorina“ genommen und soweit wie möglich sofort an Bord aufgearbeitet. Die einzelnen Methoden sollen im folgenden nur kurz genannt werden:

Die Vertikalprofile des **Salzgehaltes**, der **Temperatur** und der **Sauerstoffkonzentration** wurden mit den Sonden der Fa. WTW (Weilheim) in 1m-Abständen von der Wasseroberfläche bis ca. 0.3 m über Grund gemessen.

Für die Bestimmung der **Secchi-Tiefe** fand eine weiße Scheibe von 40 cm Durchmesser Verwendung.

Die beiden Nährstoffe **Nitrat** und **Orthophosphat** wurden photometrisch bestimmt, und zwar Nitrat nach Reduktion zu Nitrit (im Cadmiumreduktor) als Azofarbstoff und Orthophosphat nach Reduktion der Phosphomolybdänsäure (mit Ascorbinsäure als Reduktionsmittel). Die Methoden sind bei GRASSHOFF et al. (1999) dargestellt.

Die **Chlorophyll a - Konzentration** (Chl a) wurde nach dem Verfahren von LORENZEN (1967) ermittelt. Das abfiltrierte Phytoplankton wurde mit Ethanol eluiert und die Extinktion des Extraktes photometrisch gemessen. Die Konzentration der Chlorophyll-Abbauprodukte wurde gesondert bestimmt und die Chl a-Konzentrationen entsprechend korrigiert.

Die Messung der **Primärproduktion** (PP) erfolgte nach STEEMANN-NIELSEN (1952) unter Zugabe von $4 \mu\text{Ci NaH}^{14}\text{CO}_3$ je Inkubationsgefäß. Die Flaschen wurden in-situ in 6 Tiefen inkubiert.

Die **Gesamtbakterienzahl** (GBZ) und das **mittlere Bakterienzellvolumen** (MZV) wurden nach Anfärbung der Bakterien mit Acridin-Orange

unter dem Auflichtfluoreszenz-Mikroskop bestimmt (HOBBIE et al. 1977).

Die Elektronenoptischen Aufnahmen zur Analyse der **Formen der Bakterien** wurden mit dem Rasterelektronenmikroskop (Zeiss, DSM 940) gemacht. Hierzu wurden die Wasserproben durch Polycarbonat-Filter (Porengröße 0.2µm) filtriert und die zurückgehaltenen Organismen über die Kritisch-Punkt-Trocknung präpariert (ZIMMERMANN 1977).

Die **Zahl der Saprophyten**, d.h., die Zahl der auf einem festen Nährboden zu einer Kolonie herangewachsenen Zellen, wurde mit dem Kochschen Plattenverfahren bestimmt. Hierzu fand ein Hefeextrakt-Pepton-Medium (ZoBell 2216 E) mit einem Salzgehalt von 8‰ Verwendung (RHEINHEIMER 1968).

Die **Inkorporationsrate von tritiiertem Thymidin** (TTI) als Maß für die bakterielle Sekundärproduktion wurde unter Verwendung von ³H-Methylthymidin gemessen (FUHRMAN & AZAM 1982).

Zur Bestimmung der **Umsatzrate von Glukose** (TrGlu) wurden die Wasserproben mit ¹⁴C-Glukose versetzt (GOCKE 1977). Die hierzu erforderlichen Inkubationen ebenso wie diejenigen zur Bestimmung der TTI erfolgten bei Wassertemperaturen der jeweiligen Station. Glukose steht hier als ein wichtiger Vertreter der im Wasser gelösten leicht abbaubaren Verbindungen. Anhand der Messung der TrGlu lässt sich also ein Bild über die Dynamik der Umsetzungen des „Pools“ dieser gelösten Substanzen gewinnen.

Ergebnisse und Diskussion

Jahreszeitliche Verteilung

Die Jahrgänge (Januar 1991 - März 1993) der Konzentrationen von Nitrat und Orthophosphat der Stationen Kieler Bucht (Boknis) sowie Äußere (Maasholm) und Innere Schlei (Kleine Breite) sind in Abb. 2 einander gegenübergestellt. Für die plastische Darstellung wurden die gleichen Konzentrationsmaßstäbe für die drei Stationen gewählt, so dass das starke Übergewicht der Station „Kleine Breite“ sofort ins Auge fällt. Maximalwerten von Nitrat, die im Winter auftraten und mehr als 250 µmol/l in der „Kleinen Breite“ betragen, standen Konzentrationen von ca. 100 µmol/l in der Äußeren Schlei und max. 13 µmol/l in der Kieler Bucht gegenüber (GOCKE & RHEINHEIMER

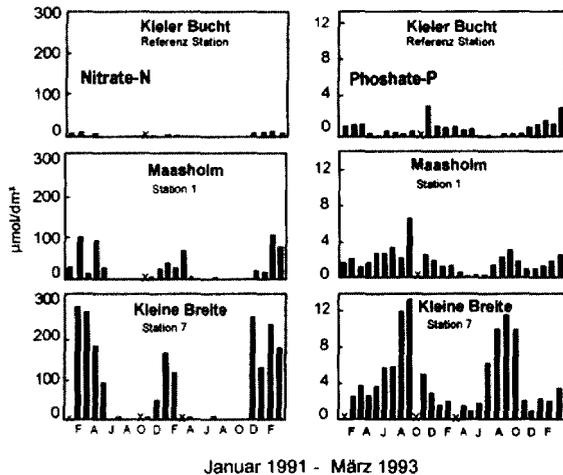


Abb. 2: Jahresgänge der Nitrat- und Orthophosphatkonzentration (x = fehlende Messwerte)

die damaligen höchsten NO_3 -Konzentrationen, die in der Regel ebenfalls in der Inneren Schlei gefunden wurden, bei maximal „nur“ $170 \mu\text{mol/l}$ (RHEINHEIMER 1970).

Die Werte von 1967 wurden demnach in den Wintern von 1990/91 und 92/93 deutlich übertroffen, stimmen aber gut mit den Konzentrationen von 1991/92 überein.

Auch bei den Konzentrationen von Orthophosphat zeigt sich wieder das Übergewicht der Inneren Schlei (Abb. 2), das aber wesentlich weniger stark ausgeprägt war als bei Nitrat. Die Maximalwerte beliefen sich auf ca. $14 \mu\text{mol/l}$ (GOCKE & RHEINHEIMER 1994). Im Jahre 1967 betragen die höchsten Konzentrationen von PO_4 auf der gleichen Station knapp $20 \mu\text{mol/l}$ (RHEINHEIMER 1979). Hieraus jedoch auf einen generellen Rückgang der Orthophosphatkonzentration in den dazwischen liegenden 25 Jahren zu schließen, wäre verfrüht. Viel wahrscheinlicher ist eine normale interannuelle Variation, wie sie auch deutlich beim NO_3 zwischen 1991 und 1993 (Abb.2) auftrat.

Die Jahresgänge des PO_4 in der Äußeren und Inneren Schlei weisen einen Konzentrationsverlauf auf, der ganz im Gegensatz zu dem

1994). Diese Angaben gelten jeweils für eine Wassertiefe von 1 m. Zu Beginn der Vegetationsperiode ging die Konzentration rasch zurück und lag im Sommer zeitweise selbst in der Kleinen Breite unter der Nachweisgrenze. Rheinheimer machte im Jahre 1967, also ein Vierteljahrhundert früher als die vorliegenden Untersuchungen, ähnliche Beobachtungen.

Allerdings lagen

„Normalverlauf“ steht, der für NO_3 auf allen Stationen und für PO_4 zumindest in der Kieler Bucht typisch ist. Die höchsten PO_4 -Konzentrationen in der Schlei traten nämlich nicht im Winter, sondern im Spätsommer auf, eine Beobachtung, die auch in den Jahren 1967 (RHEINHEIMER 1970) und 1981-1983 (RIPL 1986) gemacht wurde und wahrscheinlich bereits seit den fünfziger Jahren gilt (FEIBICKE 1994). Die Ursache dieser Erscheinung liegt in der Nährstoff-Freisetzung aus dem Sediment, also in der „internen Düngung“ des Gewässers. Zur Freisetzung kommt es im Spätsommer, wenn bei den dann relativ hohen Wassertemperaturen die Sauerstoffnachlieferung aus dem Wasser nicht mehr ausreicht, um oxische Verhältnisse in der Oberflächenschicht des Sedimentes aufrechtzuerhalten. Mit dem Zusammenbrechen ihres oxischen Zustandes erlischt die Sperrwirkung dieser Schicht gegenüber dem Phosphat und dieses kann in die unteren Wasserschichten der Schlei diffundieren. In der Schlei liegt, anders als in eutrophen Seen, in denen der Vorgang ebenfalls regelmäßig auftritt, keine dauerhafte Schichtung des Wasserkörpers vor. Dadurch gelangt das Phosphat ohne zeitliche Verzögerung, d.h. also noch während der Vegetationsphase, in die euphotische Schicht.

Die hohen Nährstoffkonzentrationen in der Inneren Schlei und die große Phytoplanktonmenge, die bei einem bloßen Blick in das grün gefärbte Wasser deutlich wird, lassen auch ohne spezielle Messungen erkennen, dass die Primärproduktion dieses Gewässers sehr hoch sein muß. Wie hoch die Primärproduktion tatsächlich ist, zeigt sich bei einer Gegenüberstellung der hypertrophen Schlei und eines oligotrophen Gebietes, dem Golf von Cadiz (westlich der Straße von Gibraltar). Aus der Abb. 3 ergibt sich, dass im Juni 1995 die Dicke der produktiven Schicht in der Schlei nur 1.5 m, im Golf von Cadiz (Mai 1991) dagegen 70 m betrug. Im letzteren befand sich das Maximum der Produktion in 40 m Tiefe, in der Schlei war die Phytoplanktondichte dagegen so hoch, dass hier infolge von „Selbstbeschattung“ der Algen die höchste Produktion direkt unter der Wasseroberfläche gemessen wurde. Einschränkend soll hier allerdings erwähnt werden, daß auch in der Schlei an sehr hellen Tagen durchaus eine Lichtschädigung der Algen beobachtet wurde. Diese war allerdings stets auf die oberen 20 cm der Wassersäule beschränkt. Wenn wir die produktivsten Schichten beider Gebiete betrachten, so steht die enorme Primärproduktion von $604 \mu\text{g C/l/h}$ in der Schlei einem nur $1.1 \mu\text{g C/l/h}$ betragenden Wert im Golf von Cadiz gegenüber (Abb.3, Teil b).

Die Primärproduktion bezogen auf die Fläche, d.h. integriert über die gesamte euphotische Schicht, weist natürlich wesentlich geringere

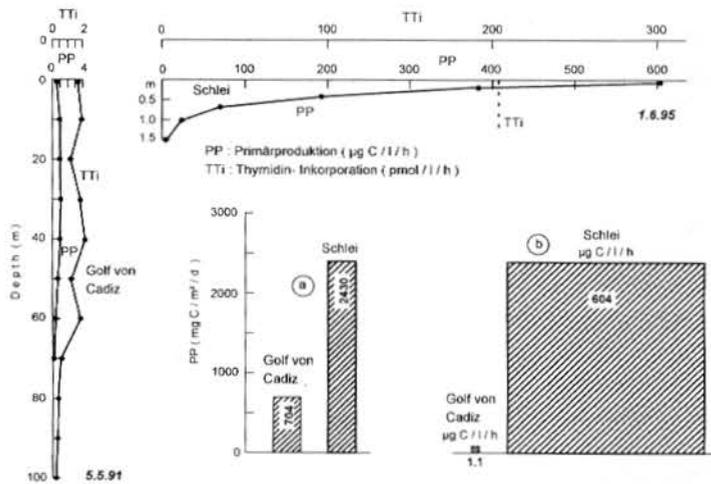


Abb. 3: Primärproduktion in der hypertrophen Inneren Schlei (Station Kleine Breite) und dem oligotrophen Golf von Cadiz. Zur Beachtung: Die Maßstäbe der Vertikalverteilung stimmen nicht überein. (Nähere Erläuterung siehe Text)

Unterschiede zwischen den beiden Gewässern auf. Hier kompensiert die große Mächtigkeit der euphotischen Schicht im Golf von Cadiz teilweise die nur kleinen Werte pro Volumeneinheit (Abb.3, Teil a).

Im Jahre 1992 belief sich die Primärproduktion auf 817 g C/m²/a in der Kleinen Breite und auf 223 g C/m²/a auf der Station Maasholm. SCHIEMANN (1974) fand bei seinen Untersuchungen in der Inneren Schlei, die im Jahre 1972 gemacht wurden, eine ähnlich große Primärproduktion (840 g C/m²/a). HÜBEL (1969) stellte fest, dass die inneren Teile der Darß-Zingster-Boddenkette ebenfalls eine wesentlich höhere Primärproduktion haben als die äußeren.

In Abb. 4 sind die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der Bakteriengemeinschaften in Wasserproben der Stationen 1 (Maasholm) und 6 (Große Breite) im Juli, September und Dezember 1991 gegenübergestellt. Sie lassen gut die Unterschiede der Bakterienmengen sowie Zellformen und -größen erkennen.

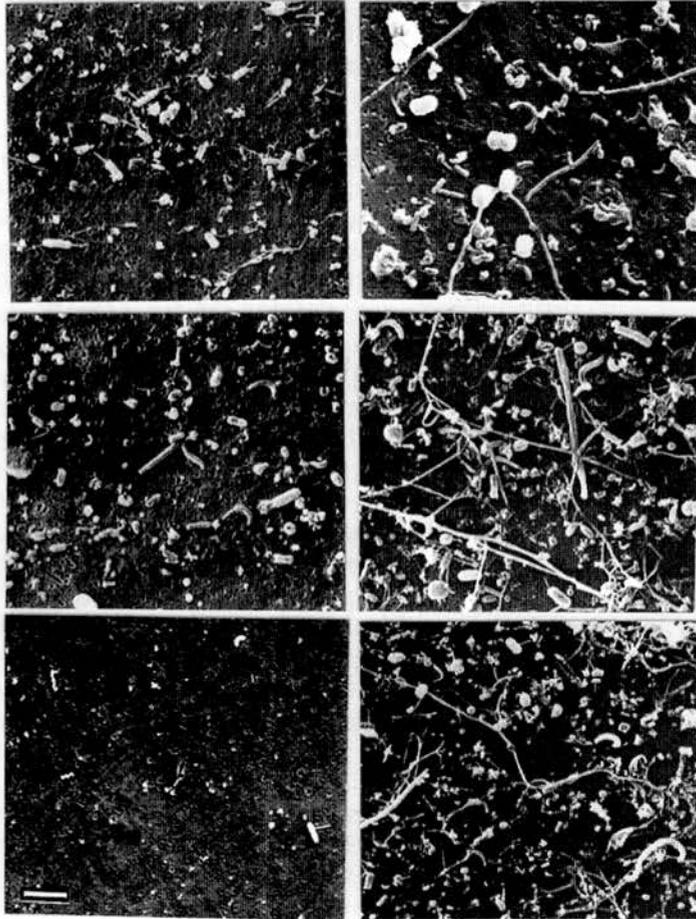


Abb. 4: Rasterelektronenmikroskopische Darstellung der Bakteriengemeinschaften. Links: Äußere Schlei (Station Maasholm), rechts: Innere Schlei (Station Kleine Breite), oben: Juli 1991, Mitte: September 1991, unten: Dezember 1991. Die Länge des weißen Balkens (unten links) repräsentiert 2 μm

Die Mikrofotos zeigen bereits auf den ersten Blick die starken Unterschiede der Bakteriengemeinschaften der beiden ausgewählten Stationen. In den Proben von der Äußeren Schlei bei Maasholm (links) war zu allen Jahreszeiten die Bakterienmenge geringer und der Anteil

der kleinen Zellen größer als in der Inneren Schlei (rechts). Aber auch die jahreszeitlichen Unterschiede sind deutlich. Die größten Bakterienmengen fanden sich am 4. September 1991 (Mitte). Neben kugelförmigen Kokken mit sehr kleinem Durchmesser unter $0.1 \mu\text{m}$ sind auf den Mikrofotos größere Zellen bis zu $1 \mu\text{m} \varnothing$ zu erkennen. Sehr häufig sind auch Stäbchen verschiedener Länge und Breite. Außerdem kommen nicht selten gebogene Zellen unterschiedlicher Größe vor. In der Inneren Schlei treten die gleichen Formen auf – es überwiegen jedoch größere Zellen. Auffällig sind hier die fadenförmigen Bakterien, die sich auch in den anderen Monaten – allerdings in geringerer Menge – finden. Es könnte sich dabei zum Teil um *Achrone-ma* handeln (P. HIRSCH, mündl.). Die Mikrofotos vom 2. Juli 1991 (oben) zeigen bei beiden Stationen geringere Bakterienmengen. Die Anzahl der gebogenen Zellen ist besonders in der Äußeren Schlei niedrig. Die nur in der Probe von der Inneren Schlei vorhandenen großen kugelförmigen Zellen dürften photosynthetische Cyanobakterien (Blualgen) sein. Die niedrigste Bakterienmenge fand sich für beide Stationen am 9. Dezember 1991. Auffallend ist besonders in der Äußeren Schlei der hohe Anteil sehr kleiner Zellen, die auf dem Mikrofoto zum Teil nur schwer zu erkennen sind.

Probenahme	Station 1	Station 6
02.07.91	9.4	18.1
04.09.91	18.4	27.5
09.12.91	4.1	9.2

Tab. 2: Gesamtbakterienzahlen ($10^6/\text{ml}$) bei Station 1 (Maasholm) und Station 6 (Große Breite).

In der Tabelle 2 finden sich die Gesamtbakterienzahlen der gleichen Proben. Diese Werte entsprechen daher in etwa den Bakterienmengen, die aus den Mikrofotos ersichtlich sind. Letztere spiegeln aber außerdem die Bakterienbiomasse in den einzelnen Proben wider. Diese ist in den Sommermonaten sehr hoch und geht im Winter stark zurück. Besonders auffällig ist das bei Station 1, wo im Dezember sehr kleine Zellen dominieren.

Die jeweils höheren Gesamtbakterienzahlen und der höhere Anteil größerer Zellen in den Bakteriengemeinschaften der Inneren Schlei sind eine Folge der stärkeren Belastung. Das gilt ebenfalls für das Vorkommen von fadenförmigen Bakterien, die sich auch in großer

Zahl in kommunalen Abwässern und Kläranlagen sowie in stark verschmutzten Binnengewässern finden.

Regionalverteilung

Während der monatlichen Messfahrten in die Schlei im Untersuchungszeitraum 1991 - 1993 konnten die meisten Parameter auf allen Stationen bestimmt werden. Die arbeitsaufwendigen und materialintensiven Bestimmungen der Bakterienaktivität mußten jedoch auf die Referenzstation Boknis (Kieler Bucht) und auf die Stationen Maasholm (Äußere -) und Schleswig (Innere Schlei) begrenzt werden. Deswegen wurden im Sommer (23.7.) und Spätherbst (24.11.98) zwei weitere Fahrten durchgeführt, bei denen ein Hauptaugenmerk diesen Aktivitätsparametern galt. Eine der Fahrten sollte in eine Phase mit ruhigem Sommerwetter, die andere in einen Zeitraum mit eher stürmischem Herbstwetter fallen. Leider wurden diese Erwartungen nur teilweise erfüllt, denn vor der Sommerausfahrt lag eine Woche, in der starke ablandige Winde vorherrschten, die allerdings zwei Tage vor dem Fahrttermin weitgehend abgeflaut waren. Während der Spätherbstfahrt war das Wetter dagegen trübe, sehr ruhig und so kalt, daß die Innere Schlei teilweise bereits von einer ca. 1-2 cm dicken Eisschicht bedeckt war.

In den Abb. 5 und 6 sind einige der Ergebnisse der beiden Untersuchungsfahrten dargestellt. Am 23.7.98 fiel der Salzgehalt (in 1 m Wassertiefe) fast gradlinig von der Kieler Bucht, in der er bei 16.4 ‰ lag, auf 5.4 ‰ in der Kleinen Breite. Dieser kontinuierliche Rückgang wurde jedoch auf der Station Maasholm (ca. 3 km von der Einfahrt entfernt) unterbrochen (Abb. 5). Hier stieg der Salzgehalt auf 18.4 ‰ an, dagegen waren die Temperatur und die Sauerstoffsättigung (nicht dargestellt) niedriger als auf den benachbarten Stationen. Dies legt den Schluß nahe, daß während der vorangehenden Tage mit ablandigen Winden Wasser aus tieferen Schichten der Kieler Bucht als bodennaher Einstrom in die Schlei eingedrungen und auf der Station Maasholm bis nahe an die Oberfläche aufgestiegen war. Die Wassertemperatur in 1 m Tiefe lag zwischen 16.2 und 20.9 °C, wobei die höchsten Temperaturen in der Inneren Schlei auftraten. Die Secchi-Tiefe als Maß für die Wassertrübung zeigte sehr klares Wasser mit 8 m Sichttiefe in der Kieler Bucht an. Auch auf der Station Maasholm war das Wasser noch so klar, dass hier die Secchi-Tiefe größer war als die Wassertiefe und deshalb in der Graphik nicht dargestellt werden konnte. Auf den anschließenden deutlichen Rückgang der Secchi-Tiefe auf den beiden weiteren Stationen der Äußeren Schlei

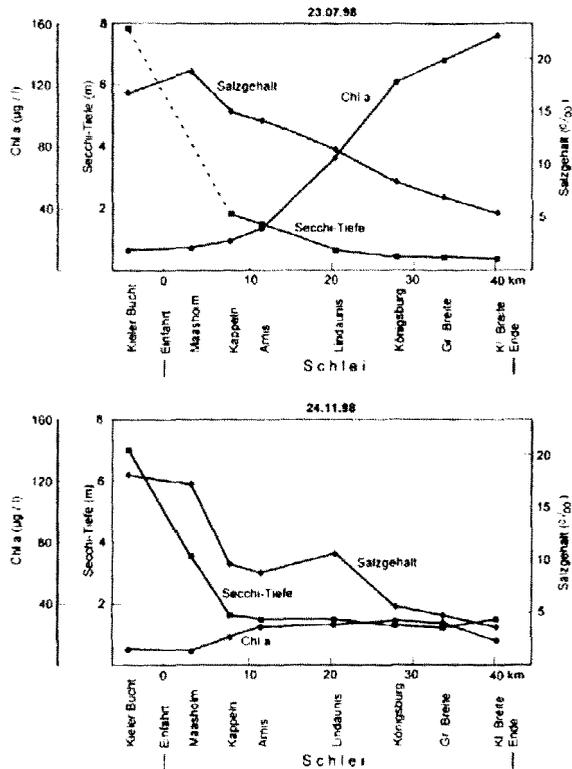


Abb. 5: Verlauf des Salzgehaltes, der Secchi-Tiefe und der Chlorophyllkonzentration (Chl a) im Längsprofil der Schlei (Messungen vom Juli und November 1998)

erfolgte in der Mittleren und Inneren Schlei nur noch ein langsamer Abfall bis auf 40 cm. Eine Secchi-Tiefe von nur 40 cm bedeutet, dass die photische Zone in etwa auf den obersten Meter der Wassersäule beschränkt war.

Die Konzentration an Chlorophyll a stieg zwischen der Kieler Bucht mit $12.6 \mu\text{g/l}$ Chl a und der Station Kappeln langsam an. In der Mittleren Schlei erfolgte dann eine gradlinige steile Zunahme, die sich in der Inneren Schlei wieder abflachte. Der Maximalwert von $151 \mu\text{g/l}$ auf der Station Kleine Breite liegt in dem Bereich, der für den Som-

mer auf dieser Station typisch ist (LENZ 1970; GOCKE & RHEINHEIMER 1994).

Am 24.11.98 sah die hydrographische Situation in der Schlei ganz anders aus als im Sommer, was sicherlich auf der ungewöhnlich ruhigen Wetterphase beruhte (Abb. 5). Von einem Ausgangswert von 17.6‰ in 1 m Tiefe in der Kieler Bucht fiel der Salzgehalt auf 3.7‰ in der Kleinen Breite ab. Ungewöhnlich groß waren die vertikalen Salzgehaltgradienten. So wurden z.B. auf der Station Kappeln ein Oberflächenwert von 9.4‰ und ein Tiefenwert (10 m Tiefe) von 18.6‰ beobachtet. Auf der Station Lindaunis betrug die vertikale Salzgehaltsdifferenz 6.8‰ . In der ganzen Schlei waren die vertikalen Gradienten stärker ausgebildet als im gesamten Jahr 1992. Während auf fast allen Stationen die oberen 2-3 m relativ gut durchmischt waren, begann der steile Salinitätsanstieg auf der Station Lindaunis bereits in weniger als 1 m Tiefe und erklärt so den Peak in der Graphik. Die Wassertemperaturen lagen zwischen 5.3 und 1.1 °C . Diese Werte gelten für die 1 m Wassertiefe. Sie waren an der Oberfläche zumindest der Inneren Schlei niedriger, da hier eine dünne Eisschicht vorhanden war. Der horizontale Temperaturgradient mit höheren Temperaturen im Sommer und niedrigeren im Winter in der Inneren Schlei verglichen mit der Kieler Bucht zeigt die altbekannte Beobachtung, dass landumschlossene, relativ kleine und flache Wasserkörper schneller dem Jahresgang der Umgebungstemperatur folgen als angrenzende offene Meeresgebiete.

Anhand der Secchi-Tiefen (Abb. 5) zeigt sich wiederum das relativ klare Wasser der Kieler Bucht und (eingeschränkt) der Station Maasholm. Von Kappeln bis zur Station Kleine Breite lag die Secchi-Tiefe im Bereich von 1.30 bis 1.60 m. Die größere Sichttiefe war umgekehrt korreliert mit der Chlorophyll-Konzentration. Bezüglich der Secchi-Tiefe und der Chl a-Menge bestanden in der Kieler Bucht und der Äußeren Schlei nur geringe Unterschiede zwischen der Sommer- und Herbstsituation. Dagegen machte sich die niedrige spätherbstliche Chlorophyll-Konzentration der Mittleren und Inneren Schlei in einem deutlichen Anstieg der Secchi-Tiefe gegenüber dem Sommer bemerkbar.

Die mikrobiologischen Ergebnisse der beiden Fahrten in die Schlei sind in Abb. 6 dargestellt. Beiden Fahrten gemeinsam ist die Tatsache, dass schlei-einwärts ab Kappeln/Arnis nur noch ein relativ geringer Anstieg der Gesamtbakterienzahl (GBZ) und der bakteriellen Aktivität (TTI) beobachtet wurde. Dies trifft besonders deutlich auf

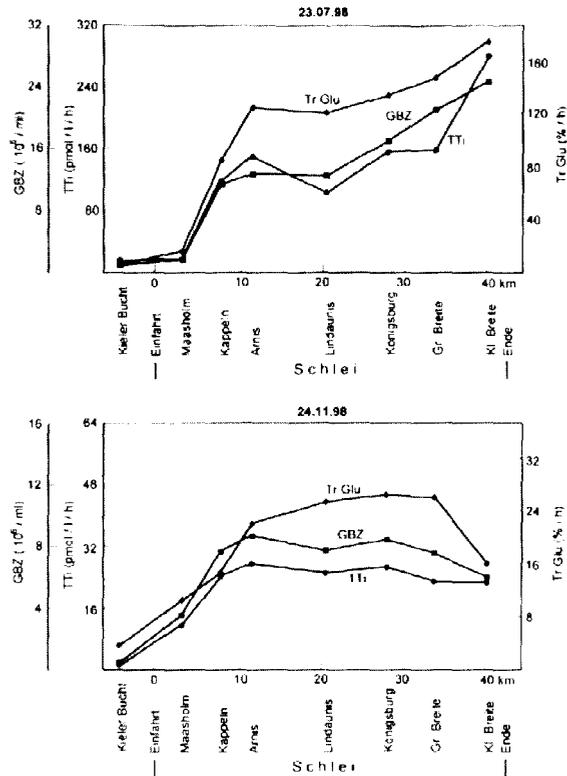


Abb. 6: Verlauf der Gesamtbakterienzahl (GBZ), der Inkorporationsrate von Thymidin (TTI) und der Umsatzrate von gelöster Glukose (TrGlu) im Längsprofil der Schlei. Messungen vom Juli und November 1998.

die Herbstsituation zu. Die starke Zunahme der Werte war also auf die Mischungsgrenze der Äußeren Schlei beschränkt. In der innersten Schlei (Kleine Breite) nahm die Gesamtbakterienzahl (GBZ) und die Umsatzrate der gelösten Glukose (TrGlu) sogar wieder etwas ab, eine Beobachtung, die auch auf die Chl a-Konzentration (Abb. 5) zutraf. Ein derartiger Rückgang ist nicht ungewöhnlich, tritt jedoch relativ selten auf (RHEINHEIMER 1970; GOCKE & RHEINHEIMER 1994). Häufiger ist der nochmalige Anstieg der Werte in der Inneren Schlei wie er bei den vorliegenden Untersuchungen auch im Sommer vorlag (RIEPER 1976).

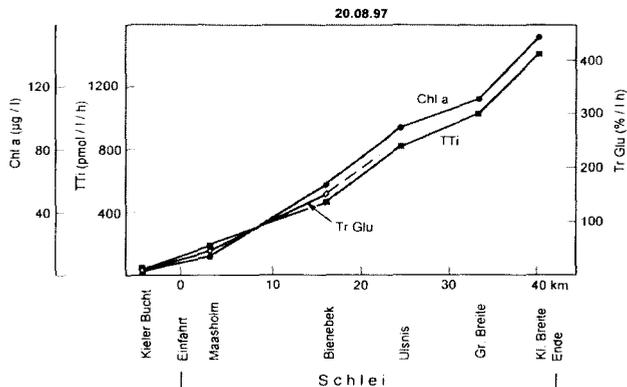


Abb. 7: Verlauf der Chlorophyllkonzentration, der Inkorporationsrate von Thymidin und der Umsatzrate von Glukose im Längsprofil der Schlei. (Ab Station Bienebeck lag die Umsatzrate außerhalb der Messbereiches, s. Text).

Deutlich ist die Größendifferenz der biologischen Parameter zwischen Sommer und Spätherbst. Vergleichen wir die Mittelwerte des „Plateau“-Bereiches zwischen Arnis und Königsburg (Abb. 6), d.h. also die Mittlere Schlei, so ging die Chl a-Konzentration von 73.7 auf 26.8 µg/l, die Gesamtbakterienzahl von 14.2×10^6 auf 8.4×10^6 Zellen/ml zurück. Die bakterielle Aktivität (TTI) fiel von 137 auf 26.7 pmol/l/h und die Umsatzrate von Glukose von 125 auf 24.2 %/h zurück. Interessant ist, dass der Rückgang der strukturellen Komponenten nicht im gleichen Maße erfolgte. Während die Chlorophyll-Konzentration (und damit mehr oder weniger gleichsinnig die Phytoplanktonbiomasse) auf 1/3 des Sommerwertes abfiel, ging die Gesamtbakterienzahl nur auf etwa die Hälfte zurück. Demnach verhält sich die Gesamtbakterienzahl erheblich konservativer als die Phytoplanktonmenge, wie dies auch von anderen Autoren häufig beobachtet wurde (s. ZIMMERMANN 1977). Natürlich sind die jahreszeitlichen Unterschiede bei den funktionellen Parametern erheblich größer, da hier die beschleunigende oder verlangsamende Wirkung der Temperatur eine große Rolle spielt. In der vorliegenden Untersuchung fielen sowohl die TTI als auch die TrGlu im Herbst auf knapp 20% des Sommerwertes zurück. Bezogen auf die einzelne Bakterienzelle erniedrigte sich die Inkorporationsrate von Thymidin von 9.6 auf 3.2×10^9 pmol/h.

Die hier gemessene bakterielle Aktivität und die Umsatzraten der gelösten Glukose in der Schlei sind außergewöhnlich hoch, wie der Vergleich mit anderen Gewässern zeigt (GÖCKE & RHEINHEIMER 1991;

HOPPE et al. 1996; HOPPE et al. 1998). So bedeutet z.B. eine Umsatzrate von Glukose von 125% / h, dass der „Pool“ der gelösten Glukose (also die Menge der gelöst im Wasser vorhandenen Glukose) eine Erneuerungszeit von nur 48 Min. hat. Es ist anzunehmen, dass wahrscheinlich auch die anderen niedermolekularen leicht abbaubaren Substanzen wie z.B. andere monomere Zucker oder freie gelöste Aminosäuren mit einer ähnlich hohen Dynamik umgesetzt werden. Nochmals erheblich höhere Werte als im Juli 1998 wurden im August 1997 nach einer langen Schönwetterphase gemessen. Wie die Abb. 7 zeigt, stiegen damals die Konzentration von Chl a, die Inkorporationsrate von Thymidin und – soweit sich das sagen lässt – die Umsatzrate von Glukose linear über die ganze Länge der Schlei an. Während die Chl a-Konzentration nicht höher war als 1998, übertrafen die damaligen TTI-Werte die späteren um ca. das Vierfache. Werte in dieser Größenordnung wurden von SCHIEWER et al. (1997) in der Darß-Zingster-Boddenkette gefunden und zwar in einem Mesokosmos-Experiment, in dem durch Nährstoffzugabe ein übermäßiges Phytoplanktonwachstum eingetreten war. Die Umsatzraten von Glukose betrug mehr als 300 %/h ab der Station Ulsnis (Mittlere Schlei) und konnten aus methodischen Gründen nicht mehr genau bestimmt werden. Mit Gewissheit läßt sich jedoch sagen, daß die Erneuerungszeit des Glukosepools kürzer war als 20 Min. Das sind Umsatzraten, die sogar die Maximalwerte in der Elbe (Geesthacht) übertreffen (GOCKE & RHEINHEIMER 1988). Ähnlich hohe Raten wurden bisher nur in einer hypertrophen tropischen Küstenlagune in Kolumbien gemessen (GOCKE unveröff.).

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der monatlichen Forschungsfahrten des Jahres 1992 in die Schlei betrachtet werden. Hier geht es weniger um die Besonderheiten der einzelnen Fahrten, als um die generellen Verhältnisse, die sich als Mittelwerte der einzelnen Parameter für das Beobachtungsjahr herauskristallisierten. In der Tab. 3 sind die Jahresmittelwerte von einigen derjenigen Meßgrößen, die auf allen Stationen bestimmt wurden, angeführt. Zusätzlich sind die beobachteten größten und kleinsten Werte angegeben, so dass die Schwankungsbreite auf den jeweiligen Stationen erkennbar ist. Abgesehen vom Salzgehalt, der „nur“ von 16.9 ‰ in der Kieler Bucht (Referenzstation Boknis) auf 6.4 ‰ in der Kleinen Breite zurückging, betrug der Rückgang (Secchi-Tiefe) oder die Zunahme (Chl a-Konzentration und Gesamtbakterienzahl) im Längsschnitt der Schlei eine Zehnerpotenz oder mehr. (Hier soll davon ausgegangen werden, dass die Station Boknis weitgehend die Verhältnisse außerhalb der Schlei widerspiegelt). Ziehen wir auch die maximalen

Station	Referenzstation (Kieler Bucht)	Maasholm	Kappein	Arnis	Lindaunis	Königsburg	Große Breite	Kleine Breite
Entfernung zur Einfahrt (km)		2.9	6.8	10.2	19.5	26.9	32.6	39.6
Salzgehalt (‰)	16.9 (13.1-19.8)	15.8 (12.1-19.5)	15.0 (11.7-18.5)	13.5 (10.9-16.4)	11.6 (9.2-16.6)	9.1 (7.9-11.3)	8.0 (7.2-9.6)	6.4 (5.1-8.8)
Secchi-Tiefe (m)	6.8 (4.0-11.0)	2.8 (1.4-4.0)	2.6 (1.2-4.8)	2.0 (0.90-3.4)	1.4 (0.75-2.0)	0.95 (0.60-1.7)	0.90 (0.60-1.5)	0.80 (0.40-1.5)
Chlorophyll a Konzentration (µg/l)	2.6 (1.0-6.9)	5.5 (0.7-19.6)	14.3 (1.2-34.7)	23.3 (1.0-67.9)	41.8 (14.6-103)	56.1 (22.0-140)	66.8 (32.6-151)	87.8 (29.4-162)
Gesamtbakterienzahl (10 ⁶ /ml)	0.89 (0.44-2.28)	2.94 (0.47-6.38)	6.40 (2.10-11.8)	8.56 (1.30-16.2)	8.71 (3.05-16.0)	10.3 (4.96-17.5)	16.1 (4.03-53.8)	16.5 (4.12-53.2)
Mittleres Bakterien- zellvolumen (µm ³)	0.134 (0.098-0.168)	0.122 (0.068-0.142)	0.115 (0.073-0.159)	0.122 (0.091-0.163)	0.119 (0.089-0.143)	0.120 (0.060-0.199)	0.131 (0.102-0.237)	0.114 (0.052-0.187)

Tab. 3: Jahresmittelwerte und Schwankungsbreiten (Werte in Klammern) einiger Parameter im Längsprofil der Schlei für das Jahr 1992.

und minimalen Werte mit in die Betrachtung ein, so ergibt sich, dass die gesamte Spannweite des Chl a und der GBZ mindestens zwei Größenordnungen beträgt. Die Secchi-Tiefe hatte eine geringere Schwankungsbreite, die sich jedoch immerhin zwischen 11 m (Kieler Bucht) und 40 cm (Kleine Breite) bewegte. Nur das mittlere Bakterienzellvolumen war im gesamten Untersuchungsgebiet weitgehend konstant. Jedoch nahm die Zahl der großen Zellen in Richtung Innere Schlei zu (Abb. 4).

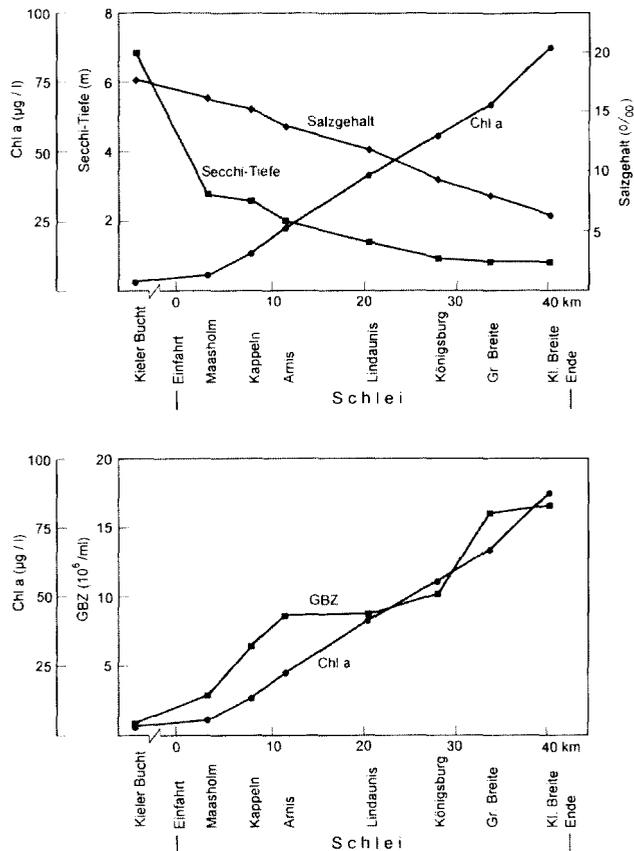


Abb. 8: Mittlerer Verlauf (Jahresmittel 1992) einiger Messgrößen im Längsprofil der Schlei.

In Abb. 8 ist die räumliche Beziehung zwischen der Größe der Parameter und ihrer Lage im Längsschnitt der Schlei graphisch dargestellt. Deutlich ist die fast lineare Abnahme des Salzgehaltes zu erkennen. Die Chlorophyll-Konzentration steigt dagegen linear an, wobei dieser ausgeprägte Anstieg erst innerhalb der Schlei beginnt. Die Secchi-Tiefe, die zum größten Teil durch die von Phytoplankton hervorgerufene Wassertrübung beeinflusst wird, geht innerhalb der Schlei mehr oder weniger gradlinig zurück. Ihre sehr ausgeprägte Abnahme zwischen der Kieler Bucht und der Station Maasholm und der anschließend weiter erfolgende langsame Rückgang zeigen, dass bei der Secchi-Tiefe neben der Phytoplanktondichte noch andere Faktoren eine Rolle spielen, die ihrerseits nicht mit der Algenmenge korreliert sind. Hier ist an die Eigenfarbe des Wassers zu denken, das in der Kieler Bucht praktisch farblos ist, in der Schlei jedoch eine deutliche Gelbfärbung aufweist. Wahrscheinlich wichtiger noch für die relativ geringen Unterschiede der Secchi-Tiefe im Längsschnitt der Schlei dürften Partikel sein, die nicht oder zumindest nicht direkt vom Phytoplankton stammen. Dies sind in erster Linie Sedimentpartikel, die bei der geringen Tiefe der Schlei und dem großen Verhältnis von Uferlinie zu Wasservolumen schon bei schwachen Wasserbewegungen schnell in die Wassersäule eingetragen werden, ein Vorgang, der in tidenbeeinflussten Küstenlagunen eine noch größere Rolle spielt (HOPPE et al. 1996). KÖSTER et al. (1997) weisen bei ihren Untersuchungen in den Nordrügenschenschen Bodden auf die Bedeutung des Sedimentes für Chemie und Biologie dieser flachen Gewässer hin.

Im innersten Teil der Schlei liegt im Mittel noch ein Salzgehalt von 6.4 ‰ vor (Tab. 3), obwohl hier der größte Süßwasserzufluß erfolgt und dadurch bedingt die Residenzzeit nur drei Monate beträgt (Tab. 1). Dies zeigt eindeutig, dass die Mischungsprozesse zwischen dem Wasser der Schlei und dem der Kieler Bucht selbst in der Inneren Schlei eine große Rolle spielen. Noch stärker trifft dies natürlich auf die weiter seewärts gelegenen Teilgebiete zu. Hieraus jedoch zu schließen, dass der Rückgang der Chl a-Konzentration oder der Bakterienzahl allein auf der Verdünnung des phytoplankton- und bakterienreichen inneren Schleiwassers mit relativ armem Wasser aus der Kieler Bucht beruht, ist sicherlich nur teilweise richtig. Dazu ist der Rückgang der biologischen Parameter viel zu ausgeprägt. So verhielten sich im Jahresmittel die Chlorophyll-Konzentrationen der Station Maasholm und Kleine Breite wie 1 : 16. Die Relation der Nährstoffkonzentration betrug dagegen nur ungefähr 1 : 3.4 (Phosphat) und 1 : 4.7 (Nitrat). Demnach ist die Phytoplanktonmenge in der Schlei

nicht nur oder zumindest nicht linear von der Nährstoffkonzentration abhängig. Vielmehr sollte hier die Dynamik des Nährstoffpools, also die Geschwindigkeit der Aufnahme- und Freisetzungprozesse eine entscheidende Rolle spielen. Außerdem dürfte die vom Salzgehalt beeinflusste Zusammensetzung des Phytoplanktons von großer Bedeutung sein (ELLBRÄCHTER 1970). Für die Secchi-Tiefe hat die Verdünnung des Schleiwassers mit Ostseewasser allerdings einen größeren Stellenwert.

Anders als beim Chlorophyll verläuft der Anstieg der Gesamtbakterienzahl (GBZ) schlei-einwärts im Jahresmittel nicht linear (Abb. 8). Vielmehr zeichnet sich der gesamte Bereich der Mittleren Schlei durch relativ gleichmäßige Gesamtbakterienzahlen aus. Ein deutlicher rascher zahlenmäßiger Anstieg trat dagegen in der Äußeren Schlei, also dem hauptsächlichlichen Vermischungsbereich der Schlei, und im Übergang von der Mittleren zur Inneren Schlei auf. Ein derartiger Kurvenverlauf läßt sich nur erklären, wenn zwar die Verdünnung durch Ostseewasser ebenfalls eine wichtige Rolle spielt, hier gut zu erkennen im Mischungsbereich der Äußeren Schlei (Abb. 8), aber bei weitem nicht allein maßgebend ist. Die Bedeutung des Phytoplanktons als wichtigem Lieferanten des organischen Materials, von dem die heterotrophen Mikroorganismen letztlich abhängig sind, spielt für die Bakterien sicherlich eine größere Rolle.

Ob durch direkte Einschwemmung von Bakterien aus allochthonen Quellen die Gesamtbakterienzahl wesentlich beeinflusst wird, ist eher unwahrscheinlich. Diese direkte Einschwemmung hat jedoch für die Saprophytenzahl einen großen Stellenwert. RHEINHEIMER (1970) berichtet, dass bei den Untersuchungen im Jahre 1967 häufig zwei Saprophytenmaxima im Längsprofil der Schlei beobachtet wurden und zwar in der Innersten Schlei und im Gebiet um Kappeln. Im Jahresdurchschnitt kam diese Keimzahlspitze allerdings nicht zum Ausdruck. In Abb. 9 ist der Verlauf der Saprophytenzahl (auf Brackwasser-Nährmedium) im Längsprofil der Schlei von 1967 und 1992 dargestellt. Statt der mittleren Absolutwerte wurden die mittleren relativen Kurvenverläufe abgebildet. Hierzu wurde die höchste Saprophytenzahl eines Monatsprofils gleich 100% gesetzt und die auf den anderen Stationen gewonnenen Werte hierauf normiert. Dadurch wird vermieden, dass einige extrem hohe Werte, wie sie bei der Saprophytenzahl immer wieder auftreten, den mittleren Kurvenverlauf über Gebühr beeinflussen (GOCKE & RHEINHEIMER 1982).

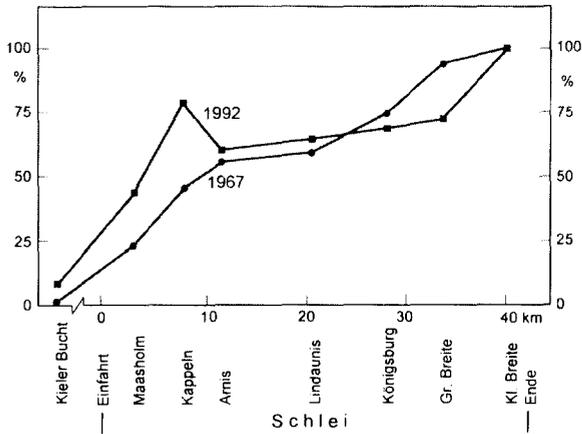


Abb. 9: Relativer Verlauf der Saprophytenzahlen (auf Brackwassernährmedium) berechnet aus den monatlichen Untersuchungen der Jahre 1967 und 1992

RHEINHEIMER (1997) stellte fest, daß die höchsten

Saprophytenzahlen in der Schlei in der Regel auf einem Brackwassernährmedium erhalten wurden. Besonders in der Inneren Schlei stieg allerdings der Anteil der saprophytischen Bakterien, die auf einem Süßwassermedium

wuchsen, stetig an.

Im Jahresdurchschnitt wurden 1967 wie 1992 die höchsten Saprophytenzahlen in der Inneren Schlei auf der Station Kleine Breite beobachtet. Die gemittelten Absolutwerte unterschieden sich jedoch mit 200×10^3 Zellen/ml (1967) gegenüber 15×10^3 Zellen (1992) im Milliliter beträchtlich. Hier hat offensichtlich der inzwischen weitgehend erfolgte Anschluss der Bevölkerung an die Kläranlagen und deren Effizienzsteigerung eine große Wirkung gehabt (GOCKE & RHEINHEIMER 1994). Die Keimzahlspitze bei Kappeln, die 1992 klar erkennbar war, und der deutliche Anstieg in der Kleinen Breite bei Schleswig zeigen aber, daß größere Ansiedlungen immer noch eine erhöhende Wirkung auf Verschmutzungs- oder Eutrophierungsparameter wie die Saprophytenzahl haben können.

Die geschilderten hydrographischen und mikrobiologischen Gradienten im Längsprofil der Schlei lassen sich auch in Zusammenhang bringen mit dem Vorkommen und der Verbreitung der benthischen Makrophytengemeinschaften, deren allgemeine Bedeutung für ein so enges, abgeschlossenes Flachgewässer wie die Schlei schon von HOFFMANN (1937) hervorgehoben wurde. Bestandsbildende Makroalgen, submerse oder emerse höhere Wasserpflanzen wie Seegräser,

Laichkräuter oder Röhrichtpflanzen sind nicht nur wichtig als Habitat oder Laichplatz für viele Tiere, sondern beeinflussen auch wesentlich den Stoff- und Energiefluß des Ökosystems, wie etwa durch Nährstoffumsatz, Gaswechsel, Produktion gelösten und partikulären Materials.

Primär ist das Vorkommen der Makrophyten in der Schlei geprägt durch den natürlichen Salzgehaltsgradienten. Ganz allgemein ist von der Mündung in die Ostsee bis in die innerste Schlei ein Übergang von überwiegend marinen oder Brackwasser-Formen der Kieler Bucht zu limnischen Formen zu beobachten. Betrachtet man allerdings die ökophysiologische Bandbreite der Salzgehaltstoleranz der vorkommenden Pflanzen, ergibt sich, dass neben dem Salzgehalt andere Faktoren zunehmend größeren Einfluß auf die benthische Vegetation bekommen haben, wie deren starke Veränderungen während der vergangenen Jahrzehnte zeigen.

Die ersten Untersuchungen über die Verbreitung der Benthosvegetation in der Schlei (MAGNUS 1875; HOFFMANN 1937) ergaben noch ein vergleichbares Bild, das gekennzeichnet war durch das Vorherrschen von ausgedehnten Phytobenthosgemeinschaften.

Zu Beginn der 30er Jahre kamen noch verschiedene Großalgen bestandsbildend weit innerhalb der Schlei vor (*Enteromorpha* spp., *Monostroma* (= *Ulvopsis*) *grevillei*, *Ceramium diaphanum* bis Schleswig; *Fucus vesiculosus*, *Polysiphonia* spp. in der Großen Breite; *Pilayella littoralis*, *Corda filum*, *Ulva lactuca* bis Missunde).

Submerse Phanerogamen wuchsen im ganzen Bereich der Schlei in zusammenhängenden Beständen: Das marine Seegras *Zostera marina* bildete ausgedehnte Wiesen besonders in der Maasholmer Breite und kam noch zwischen Lindaunis und Missunde bei $S = 8-9\text{‰}$ vor.

Von den Limnophyten drangen die Laichkrautgewächse (Potamogetonaceae) am weitesten in das Salzwasser vor. *Zannichellia palustris* wurde in ausgedehnten Beständen in der Äußeren Schlei (Wormshöfter Noor) bis hinein nach Schleswig gefunden, während *Potamogeton pectinatus*, *P. fluitans*, sowie *Myriophyllum spicatum* erst ab Lindaunis schlei-einwärts vorkamen.

Für die Innere Schlei weiter westlich wurden *Najas major*, *Ranunculus baudotii*, *R. fluitans*, *Potamogeton perfoliatus*, *Ceratophyllum demersum* als häufig vorkommende, oft flächendeckende Arten angegeben. Auch

wuchsen damals im unteren Litoral der gesamten Schlei auf ausgedehnten Flächen brackwasserliebende Characeen, vor allem *Chara baltica*, in geringerem Umfang auch Arten der Gattungen *Tolypella* und *Nitella*.

Die Uferzone der Schlei war fast durchgehend mit dichten Beständen von Schilf- und Röhrichtpflanzen bewachsen. Die am weitesten verbreitete Art von der Maasholmer Breite bis hin nach Schleswig war das Reet oder gemeine Schilf, *Phragmites australis*. Daneben fanden sich, wenn auch weniger häufig, *Scirpus maritimus* und *Sc. tabernaemontani*, und vereinzelt *Sc. parvulus*. Vom Gunnebyer Noor schlei-einwärts bis ins Selker Noor mischte sich zu dem Schilf der gegen höhere Salzgehalt empfindlichere Rohrkolben *Typha latifolia*.

HOFFMANN (1937) wie auch REMANE (1937) wiesen schon auf gelegentlich auftretende Fischsterben und die Anreicherung von Faulschlamm als erste Anzeichen einer Belastung der Schlei hin.

Etwa seit den 40er Jahren wurden bis in die Gegenwart zunehmend auch stärkere Veränderungen der Makrophytenvegetation beobachtet, die in erster Linie einer zunehmenden Eutrophierung der Schlei zugeschrieben wurden. (KÄNDLER 1953; KÄNDLER 1956; NELLEN 1963; KÖNIG 1970; FLENTGE 1972; RIPL 1986; STERR und MIERWALD 1991; SCHRAMM et al. 1996).

Untersuchungen durch RIPL (1986) an einem Sedimentkern aus der innersten Schlei (Kleine Breite) über die Phosphor- und Stickstoffanreicherung im Sediment der letzten 4000 Jahre zeigten, dass die für Gewässer glazialen Ursprungs wie die Schlei typische natürliche Eutrophierung bereits vor etwa 120 Jahren sprunghaft zunahm. Dieses wurde zurückgeführt auf die rasche Zunahme der Bevölkerungsdichte und die damit verbundenen Veränderungen in der Nutzung des Schlei-Einzugsgebietes: Unzureichende Abwasserbehandlung im ländlichen Raum und dadurch erhöhte Befruchtung der Vorfluter mit Nähr- und Schadstoffen, die zunehmende direkte Einleitung ungereinigter kommunaler und gewerblicher Abwässer in die Schlei, besonders aber die Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion durch Verwendung von Mineraldüngern und Gülle führte zu ständig zunehmendem Nährstoffeintrag in die Schlei.

Dieser führte zu für Flachgewässer typischen Phasen zunehmender Eutrophierung, die besonders gekennzeichnet sind durch den Wechsel von der Dominanz benthischer Makrophytengemeinschaften zu

Planktongemeinschaften (SCHRAMM & NIENHUIS 1996): Bei steigendem Nährstoffangebot werden im Vergleich zu meistens langsamer wachsenden längerlebigen Makrophyten saisonal auftretende schnell wachsende Nährstoffopportunisten des Phytoplanktons oder der Makroalgen (vorwiegend epiphytische oder freischwimmende Formen) begünstigt (Abb. 10).

Die Massenentwicklung (Blüten) dieser Formen führen zu erhöhter Trübung, verringerter Sichttiefe und damit zur Verschlechterung des Lichtklimas im Phytobenthos.

Nach dem Zusammenbruch solcher Blüten kommt es durch den heterotrophen Abbau besonders in der Bodengrenzschicht zu starker Sauerstoffzehrung bis hin zu anoxischen Bedingungen. Trotz der guten Durchmischung des flachen Schleiwassers und damit Sauerstoffversorgung kann die pflanzliche Biomasse nicht vollständig aerob abgebaut werden. Der Rest wird als Faulschlamm abgelagert, der unter anoxischen Bedingungen vor allem durch bakterielle Sulfatatmung unter Bildung des hochgiftigen Schwefelwasserstoffs weiter abgebaut wird. Hierdurch kommt es zu einer weiteren Schädigung der durch Lichtmangel schon benachteiligten benthischen Pflanzengemeinschaften, bis hin zu ihrem völligen Verschwinden.

Beginnend in den 30er Jahren bis heute lässt sich in der Schlei der Ablauf dieser Phasen verfolgen.

Am weitesten fortgeschritten ist der Eutrophierungszustand in der innersten Schlei. Die Makrophytengemeinschaften sind völlig verdrängt worden durch die im Sommer regelmäßig auftretenden starken Planktonblüten, insbesondere von Blaualgen, die in schwächerer Form schon von MAGNUS (1875) erwähnt wurden. Nur noch im flachen Uferbereich findet man vereinzelt Phanerogamen und auf Steinen *Enteromorpha intestinalis*.

Auch in der Mittleren Schlei sind im tieferen Wasser nahezu alle Makroalgen verschwunden. *Fucus vesiculosus*, der Anfang der 60er Jahre noch bei Lindaunis bestandbildend vorkam, dringt heute nur noch bis etwas südlich von Arnis vor (Abb. 1).

In der Äußeren Schlei (Maasholmer Breite und angegliederte Buchten und Noore) findet man auch heute noch zusammenhängende Großalgen- und Phanerogamenbestände, vor allem *Zostera marina* im tiefe-

ren Wasser, sowie *Ruppia maritima* und *Zannichellia pallustris* in den flacheren Bereichen.

Während einige Makroalgenarten hier schon seit Anfang der 70er Jahre im Vergleich zu Hoffmanns Bestandaufnahme nicht mehr gefunden wurden (FLENTGE,1972), fällt die immer häufiger auftretende Massenentwicklung gewisser saisonaler Makroalgen, insbesondere Nährstoffopportunisten (schnelle Nährstoffaufnahme und rasches Wachstum) auf, wie *Pilayella littoralis*, *Enteromorpha intestinalis* vor allem im Flachwasser, *Ceramium nodulosum*, *Polysiphonia* spp. im etwas tieferen Wasser.

Diese Algen entwickeln sich in großen Mengen zunächst angeheftet auf kleinen Steinen, Muschelschalen, oder aber epiphytisch auf *Fucus* und Seegras. Die ausgewachsenen Pflanzen werden oft von den Substrata abgerissen und können dann in dichten Matten an der Oberfläche treiben oder am Boden flottierende Algenmassen bilden. Beim Abbau der absterbenden Algen durch Bakterien kommt es besonders bei warmem, ruhigem Wetter in den bodennahen Wasserschichten rasch zu anoxischen Bedingungen und H₂S-Entwicklung, die zum Absterben von Bodenfauna und oft auch Fischen führen.

In der gesamten Schlei sind die vormals weitverbreiteten Characeen völlig verschwunden.

Auch die früher überall vorkommenden dichten Röhrichtgemeinschaften wurden stark dezimiert, scheinen sich in den letzten Jahren allerdings wieder auszubreiten. Möglicherweise spielte hierbei eine Rolle, dass die Schilfbestände zunehmend weniger abgeerntet wurden. Erhebliche Mengen an organischer Substanz, die früher zusammen mit den gebundenen Nährstoffen aus dem System entfernt wurden, sammelten sich im Bereich des Schilfgürtels oder in tieferen Rinnen und Senken und verstärkten dort den heterotrophen Abbau mit den zuvor geschilderten negativen Folgen für die benthische Flora und Fauna. Damit kam es auch zu einem starken Anstieg der Bakterienmenge und einer Veränderung der Mikrobengemeinschaften – vor allem einer Zunahme von zellulosezersetzenden Mikroben.

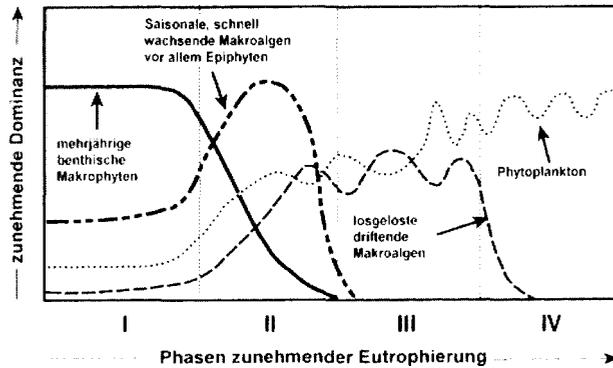


Abb. 10 Relative Dominanz der Primärproduzenten im Verlauf zunehmender Eutrophierung (verändert aus SCHRAMM & NIENHUIS, 1996)

Zusammenfassung

Die Schlei ist die Förde der schleswig-holsteinischen Ostseeküste mit den stärksten Landeinflüssen. Diese wirken sich in hohem Maße auf deren chemische und biologische Verhältnisse aus. In den Jahren 1991-1998 erfolgten daher eingehende Untersuchungen, um eventuelle Veränderungen gegenüber früheren Meßreihen festzustellen und durch den Einsatz von neuen Methoden die bisherigen Kenntnisse zu erweitern und zu vertiefen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Salzgehalt von der Kieler Bucht bis zur Kleinen Breite bei Schleswig mehr oder weniger kontinuierlich abnimmt. Der Chlorophyll-a-Gehalt steigt im Sommer bis auf das Hundertfache an. Die Maximalwerte von Nitrat werden im Winter gemessen und steigen dann von der Kieler Bucht zur Kleinen Breite bis auf das Zwanzigfache. Orthophosphat hat die höchsten Werte dagegen im August – wiederum in der Kleinen Breite. Die Gesamtbakterienzahlen steigen von der Kieler Bucht bis Arnis steil an. Im Jahres-

durchschnitt zeigt sich in der Mittleren Schlei ein Plateau und dann ein weiterer Anstieg in der Inneren Schlei. Die Werte sind im Sommer 2-3 mal höher als im Winter. Noch größer ist die Differenz bei den Aktivitätsparametern (Inkorporationsrate von Thymidin und Umsatzrate von Glukose). Rasterlektronenmikroskopische Aufnahmen von Wasserproben aus der Äußeren und Inneren Schlei lassen die großen jahreszeitlichen und regionalen Unterschiede der Bakteriengemeinschaften erkennen. Die hydrographischen, chemischen und einige der biologischen Parameter (Chlorophyll a, Saprophytenzahl) werden mit den 1967 gemessenen Werten verglichen und die Ergebnisse im Einzelnen erläutert und diskutiert. Weiter werden die Veränderungen der Makrophytenflora seit den ersten Untersuchungen von MAGNUS (1875) dargestellt.

Literatur

- Degn, Chr. & Muuß, U. (1966): Topographischer Atlas Schleswig-Holstein. - Karl Wachholtz Verlag, Neumünster.
- Ehrhardt, M. & Wenck, A. (1984): Wind pattern and hydrogen sulfide in shallow waters of the Western Baltic Sea, a cause and effect relationship? - Kieler Meeresforsch. 30, 101-110.
- Ellbrächter, M. (1970): Phytoplankton und Ciliaten. In: Chemische, mikrobiologische und planktologische Untersuchungen in der Schlei im Hinblick auf deren Abwasserbelastung. Kieler Meeresforsch. 26, 193-202.
- Feibicke, M. (1994): Strukturelle und funktionelle Studien zum Phytoplankton und Zooplankton in einer hypertrophen Brackwasserförde (Innere Schlei, Westliche Ostsee). - Thesis Freie Universität Berlin.
- Flentge, H.D. (1972): Die Benthosvegetation der Schlei. Wissenschaftl. Arbeit für die 1. Staatsprüfung für das Lehramt in Schleswig-Holstein. 68 p.
- Franke, A. (1995): Das Luftdruckfeld über Schleswig-Holstein. - Diplomarbeit, Universität Kiel.
- Fuhrman, J.A. & Azam, F. (1982): Thymidine incorporation as a measure of heterotrophic bacterioplankton production in marine surface waters: evaluation and field results. - Mar. Biol. 66, 109-120.
- Gocke, K. (1977): A comparison of methods for determining the turnover times of dissolved organic compounds. - Mar. Biol. 42, 131-141.
- Gocke, K. & Rheinheimer, G. (1982): Hydrographische Einflüsse auf Bakterienverteilung und bakterielle Aktivität in einer eutrophierten Ostseeförde. - Bot. Mar. 25, 7-17.
- Gocke, K. & Rheinheimer, G. (1988): Microbial investigations in rivers. VII. Seasonal variations of bacterial numbers and activity in eutrophied rivers of Northern Germany. - Archl. Hydrobiol. 112, 197-219.
- Gocke, K. & Rheinheimer, G. (1991): Influence of eutrophication on bacteria in two fjords of the Western Baltic. - Int. Revue ges. Hydrobiol. 76, 371-385.
- Gocke, K. & Rheinheimer, G. (1994): Eutrophierung der Schlei-Vergangenheit und Gegenwart. - Bodden 1, 31-49.

- Grasshoff, K., Kremling, K. & Ehrhardt, M. (eds.) (1999): Methods of seawater analysis. Third, completely revised and extended edition. Wiley-VCH, Weinheim, 600 p.
- Hobbie, J.E., Daley, R. & Jasper, S. (1977): Use of Nuclepore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy. - *Appl. Environ. Microbiol.* 33, 1225-1228.
- Hoffmann (1937): Die Pflanzenwelt. In: Neubaur, R. & Jaeckel, S. (Hrsg.). Die Schlei und ihre Fischereiwissenschaft. Schriften d. Naturwiss. Vereins Schleswig-Holstein 22, 230-248.
- Hoppe, H.-G., Giesenhagen, H.C. & Gocke, K. (1998): Changing patterns of bacterial substrate decomposition in a eutrophication gradient. - *Aquat. Microbiol. Ecol.* 15, 1-13.
- Hoppe, H.-G., Gocke, K. & Alcántara, F. (1996): Shifts between autotrophic and heterotrophic processes in a tidal lagoon (Ria de Aveiro, Portugal). *Arch. Hydrobiol. Spec. Issues Advanc. Limnol.* 48, 39-52.
- Hübel, H. (1969): Die Primärproduktion des Phytoplanktons in Brackgewässern unterschiedlichen Salz- und Nährstoffgehalts. - *Limnologica* 7, 185-190.
- Kändler, R. (1953): Hydrographische Untersuchungen zum Abwasserproblem in den Buchten und Förden der Ostseeküste Schleswig-Holsteins. *Kieler Meeresforsch.* 9, 176-200.
- Kändler, R. (1956): Die hydrologischen Verhältnisse in den Buchten und Förden der Ostseeküste Schleswig-Holsteins im Hinblick auf die Abwasserbelastung. *Arbeiten Deutsch. Fischerei. Verbd.* 7, 17-24.
- König, D. (1970): Landschaftlich-ökologische Fakten und Abwasserbelastung. In: Chemische, mikrobiologische und planktologische Untersuchungen in der Schlei im Hinblick auf Abwasserbelastung. *Kieler Meeresforsch.* 26, 111-119.
- Köster, M., Dahlke, S. & Meyer-Reil, L.-A. (1997): Microbial studies along a gradient of eutrophication in a shallow coastal inlet in the southern Baltic Sea (Nordrügensche Bodden). - *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 152, 27-39.
- Lenz, J. (1970): Seston-, Chlorophyll- und Eiweißgehalt. In: Chemische, mikrobiologische und planktologische Untersuchungen in der Schlei im Hinblick auf deren Abwasserbelastung. - *Kieler Meeresforsch.* 26, 180-192.
- Lorenzen, C.J. (1967): Determination of chlorophyll and phaeopigments: Spectrophotometric equations. - *Limnol. Oceanog.* 12, 343-346.
- Magnus, P. (1875): Bericht über die botanischen Ergebnisse der Untersuchung der Schlei vom 7-10. Juni 1874. *Verhdlg. Bot. Ver. D. Provinz Brandenburg* 17.
- Nellen, W. (1963): Fischereibiologische und faunistische Brackwasseruntersuchungen in der Schlei, einer Ostseeförde in Schleswig-Holstein. Thesis Univ. Kiel.
- Nellen, W. & Rheinheimer, G. (1970): Salzgehalt. In: Chemische, mikrobiologische und planktologische Untersuchungen in der Schlei im Hinblick auf deren Abwasserbelastung. - *Kieler Meeresforsch.* 26, 123-126.
- Remane, A. (1937): Die übrige Tierwelt. In: Neubaur, R. & Jaeckel, S. (Hrsg.) Die Schlei und ihre Fischereiwirtschaft. Schriften d. Naturwiss. Vereins Schleswig-Holsteins 22, 209-224.
- Rheinheimer, G. (1968): Beobachtungen über den Einfluß von Salzgehaltsschwankungen auf die Bakterienflora der westlichen Ostsee. - *Sarsia* 34, 253-262.
- Rheinheimer, G. (1970): Ammoniak-, Nitrit-, Nitrat- und Phosphatgehalt. In: Chemische, mikrobiologische und planktologische Untersuchungen in der Schlei im Hinblick auf deren Abwasserbelastung. - *Kieler Meeresforsch.* 26, 130-132

- Rheinheimer, G. (1970): Sauerstoffhaushalt. In: Chemische, mikrobiologische und planktologische Untersuchungen in der Schlei im Hinblick auf deren Abwasserbelastung. - Kieler Meeresforsch. 26, 126-128.
- Rheinheimer, G. (1970): Bakterienverteilung. In: Chemische, mikrobiologische und planktologische Untersuchungen in der Schlei im Hinblick auf deren Abwasserbelastung. - Kieler Meeresforsch. 26, 150-156.
- Rieper, M. (1976): Investigations on the relationship between algal blooms and bacterial populations in the Schlei Fjord (western Baltic Sea). - Helgoländer wiss. Meeresunters. 28, 1-18.
- Ripl, W. (1986): Restaurierung der Schlei.- Bericht über ein Forschungsvorhaben im Auftrag des Landesamtes für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holsteins, 86 S.
- Schiemann, S. (1974): Die Primärproduktion des Phytoplanktons der Schlei und des Windebyer Noors im Jahre 1972. (Ein Vergleich von Methoden und Biotopen.) - Thesis Univ. Kiel.
- Schiewer, U., Jost, G., Gocke, K., Schumann, R., Spittler, P. & Heerkloss, R. (1997): Daily pattern of microbial communities in mesocosms. - Proc. 14th Baltic Mar. Biologists Symp., 248-259.
- Schramm, W. & Nienhuis, P. H. (eds.) (1996): Marine benthic vegetation: Recent changes and the effects of eutrophication. Ecological studies Vol. 123. Springer, Berlin, Heidelberg, 470 p.
- Schramm, W., Lotze, H. & Schories, D. (1996): Eutrophication and macroalgal blooms in inshore waters of the German Baltic Coast: The Schlei Fjord, a case study. EUMAC Synthesis Report, Brussels 18-73.
- Statistisches Landesamt Schleswig-Holstein (1986): Nutzungsarten der Bodenflächen in Schleswig-Holstein. Ergebnisse der Flächenerhebung 1985.- Statist. Ber. des Statist. Landesamtes Schleswig-Holstein, Kiel.
- Steemann Nielsen, E. (1952): The use of radioactive carbon (C¹⁴) for measuring organic production in the sea. - J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer 18, 117-140.
- Sterr, H. & Mierwald, U. (1991): Naturräumliche Ausstattung und ökologische Probleme der Schlei und ihrer Uferlandschaft. Kieler Geographische Schriften 80, 343-367.
- Wendker, S. (1990): Untersuchungen zur subfossilen und rezenten Diatomeenflora des Schlei-Ästuars (Ostsee). - Bibl. Diatomologica 20. Cramer, Stuttgart.
- Wienker, V. (1997): Die innere Schlei - Belastung und Sanierung. Arbeit zur Prüfung für das Lehramt in Geographie, Universität Kiel, 104 S.
- Zimmermann, R. (1977): Estimation of bacterial number and biomass by epifluorescence microscopy and scanning electron microscopy.- In: Rheinheimer, G. (ed.) Microbial ecology of a brackish water environment. Springer Verlag, Berlin, p. 103-120.

Danksagung

Die Autoren danken Frau R. Koppe, Frau R. Wiecher und Herrn H.-D. Sell für ihre tätige Mithilfe auf den Forschungsfahrten und für die Aufarbeitung des Probenmaterials. Herrn Kapitän Ohl und der Besatzung des FK „Littorina“ gilt unser Dank für ihre Mitwirkung bei den Messungen und Probennahmen in der Kieler Bucht und Schlei.

Anschriften der Verfasser

Dr. Klaus Gocke
Prof. Dr. Gerhard Rheinheimer
Dr. Winfried Schramm

Institut für Meereskunde an der Universität Kiel
Düsternbrooker Weg 20
24105 Kiel