

# **Erstbesiedlung künstlicher Riff-Module**

**Einfluss der Oberflächeneigenschaften von Beton auf  
die Besiedlung durch Makrobenthos**

**Semesterarbeit**

**im Forschungsbereich „Marine Ökologie“  
des Instituts für Meereskunde Kiel**

**betreut von**

**Dr. Heye Rumohr**

**vorgelegt von**

**Sven Neulinger**

**Zeitraum der Anfertigung: Mai bis Oktober 2001**

## Danksagung

Ich möchte all jenen meinen Dank aussprechen, die mich bei der Anfertigung dieser Semesterarbeit unterstützt haben:

- Stefan Krause (Firma *MariLim* Kiel) für seine Hilfe bei der Planung und Durchführung der Versuche sowie bei der Artenbestimmung;
- Dr. Heye Rumohr (Institut für Meereskunde Kiel, FB marine Ökologie/ Benthosökologie) für die Leihgabe der Unterwasser-Fotoausrüstung und den Hinweis auf das Analyseprogramm *BioDiversity Pro*;
- Elisabeth Schumacher für die Mitfahrgelegenheit zum Untersuchungsort;
- Dr. Martin Zimmer (zoologisches Institut, Abteilung Limnologie/ physiologische Evolutionsökologie) für die Unterstützung bei der Varianzanalyse und Tipps zur statistischen Auswertung

## **Inhalt**

Zusammenfassung.....	4
1 Einleitung.....	5
1.1 Künstliche Riffe und Riff-Module.....	5
1.2 Wissenschaftlicher Rahmen der Arbeit.....	6
1.3 Beton als Substrat .....	6
1.4 Fragestellung und Hypothesen .....	6
2 Material und Methoden.....	8
2.1 Substrat.....	8
2.2 Untersuchungsort.....	9
2.3 Ermittlung der Bewuchsgeschwindigkeit .....	10
2.4 Charakterisierung der Artengemeinschaft.....	13
3 Ergebnisse .....	14
3.1 Abiotische Faktoren.....	14
3.2 Bewuchsgeschwindigkeit .....	14
3.3 Artengemeinschaft .....	17
3.4 Randbeobachtungen.....	18
4 Diskussion.....	19
4.1 Abiotische Faktoren.....	19
4.2 Bewuchsgeschwindigkeit .....	19
4.3 Artengemeinschaft .....	20
4.4 Randbeobachtungen.....	20
4.5 Fazit.....	20
4.6 Fehlerquellen und Methodenkritik .....	21
Anhang .....	23

## Zusammenfassung

Seit etwa einem Jahrzehnt werden weltweit Riffmodule aus Gussbeton, sog. Reef Balls, zur Gestaltung künstlicher Riffe eingesetzt. Im Sommer 2001 wurde erstmals von der Firma *MariLim* ein Reef-Ball-Projekt in der Ostsee gestartet. Die vorliegende Semesterarbeit wurde im Rahmen dieses Projektes durchgeführt und untersucht den Einfluss der Eigenschaften Oberflächen-pH und -struktur von Beton auf die Erstbesiedlung durch Makrobenthos.

Während unbehandelter Beton mit einem pH-Wert von 12,5 äußerst basisch ist, kann durch Verwendung eines versiegelnden Zuschlags ein pH-Wert von 8,3 – ähnlich dem des Meerwassers – erreicht werden. Für die Untersuchungen wurden Betonplatten unterschiedlicher Wasserdichtigkeit und Oberflächenstruktur hergestellt und über einen Zeitraum von sieben Wochen in der Kieler Förde exponiert.

Es wurden Bewuchsgeschwindigkeit und Diversität der etablierten Artengemeinschaft untersucht. Während ein deutlicher positiver Einfluss von versiegeltem gegenüber wasserdurchlässigem Beton auf die Bewuchsgeschwindigkeit gefunden wurde, konnte ein solcher für die Rauigkeit des Substrates nicht nachgewiesen werden. Die Diversität der sich entwickelnden Artengemeinschaft zeigt keine Abhängigkeit von den Oberflächeneigenschaften des Substrates.

# 1 Einleitung

## 1.1 Künstliche Riffe und Riff-Module

Als „künstliche Riffe“ sind alle vom Menschen gemachten Strukturen zu verstehen, die im Meer oder Süßwasser versenkt wurden. Hierzu zählen beispielsweise Schiffswracks, Wellenbrecher, Industrieanlagen und Brückenpfeiler. Seit einigen Jahrzehnten werden vorwiegend ausgediente Schiffe versenkt, um Ersatz für zerstörte natürliche Riffe zu schaffen oder bestehende Habitate zu ergänzen. Eine weitere Intention ist die „Aufwertung“ bestimmter Lokalitäten für den Tauchsport. Die ökologische Bedeutung künstlicher Riffe als Lebensraum für marine und limnische Organismen ist Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Untersuchungen.

Die *Reef Ball Development Group Ltd.* in Bradenton, Florida, entwickelte Anfang der 1990er Jahre hohle Riff-Module aus Gussbeton. Seit 1992 wurden weltweit mehr als 250'000 dieser „Reef Balls“ (Abbildung 1) in über 3'500 Projekten zum Bau künstlicher Riffe eingesetzt.



Abbildung 1: Reef Balls unter Wasser

## 1.2 Wissenschaftlicher Rahmen der Arbeit

Im Mai 2001 startete die Kieler Firma *MariLim* das erste Projekt zum Einsatz von Reef Balls in der Ostsee. Hauptziel dieses Projektes ist, eine für die Besiedlung günstige Betonzusammensetzung und Oberflächenstruktur zu finden. Im Rahmen jenes Projekts ist diese Semesterarbeit auch als Vorversuch zu werten, der erste Hinweise auf Gesetzmäßigkeiten der frühen Besiedlung des künstlichen Hartsubstrates liefern soll.

## 1.3 Beton als Substrat

Das Grundproblem bei der Verwendung von Beton als Substrat für die Besiedlung durch aquatische Organismen ist seine starke Basizität: Frischer Beton weist einen pH-Wert von 12,5 auf, hervorgerufen durch einen hohen Anteil an Calciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Durch Reaktion mit im Wasser gelöstem  $\text{CO}_2$  bzw.  $\text{HCO}_3^-$  kommt es zur Neutralisation des Calciumhydroxids, der Beton wird „carbonatisiert“.

Solange der Beton nicht carbonatisiert ist, gibt er  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  an das Wasser ab, was zu einer starken Erhöhung des pH-Wertes in der oberflächennahen Wasserschicht führt. Soll dieser Effekt unterbunden werden, wird dem Beton bei der Herstellung sog. Mikrosilica (Silicastaub, engl. silica fume) zugeschlagen. Es handelt sich dabei um glasig erstarrtes, amorphes Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) mit einer Korngröße von 0,1-1  $\mu\text{m}$ , das die Aufgabe hat, die Betonoberfläche zu versiegeln und damit das Auswaschen von  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  weitgehend zu unterbinden. Der Oberflächen-pH wird so auf 8,3 gesenkt, was etwa der Basizität von Meerwasser entspricht.

## 1.4 Fragestellung und Hypothesen

Die Chemie des Betons (s. 2.2) sowie seine Oberflächenstruktur sind zwei Parameter, die theoretischen Überlegungen zufolge einen merklichen Einfluss auf die Besiedlung dieses Substrates haben sollten: Ein Substrat mit einem hohen Oberflächen-pH-Wert – verglichen mit dem pH des umgebenden Meerwassers – sollte schlechter zu besiedeln sein als ein im Vergleich zur Umgebung neutraler Untergrund. Ebenso ist von einer rauen Oberfläche zu erwarten, dass sie sich

günstiger auf die Besiedlung auswirkt als eine glatte Oberfläche, da sie vielfältigere Anheftungsmöglichkeiten bietet.

Die Qualität der Besiedlung beinhaltet sowohl die Bewuchsgeschwindigkeit als auch die Diversität der sich etablierenden Artengemeinschaft. Es ist anzunehmen, dass ein schlecht geeignetes Substrat langsamer und weniger divers besiedelt wird als ein gut geeignetes Substrat.

Dieser Arbeit liegt daher folgende *Fragestellung* zugrunde:

*Haben die Wasserdurchlässigkeit des Betonsubstrates – hier die Verwendung von Mikrosilica – und die Oberflächenstruktur des Substrates einen Einfluss auf die Erstbesiedlung durch Makrobenthos?*

Es lassen sich vier *Arbeitshypothesen* ( $H_A$ ) formulieren:

$H_{A1}$ : *Durch Zugabe von Mikrosilica wasserdichter Beton wird schneller von Makrobenthos bewachsen als solcher, der nicht mit diesem Zuschlag versetzt ist.*

$H_{A2}$ : *Beton mit rauer Oberfläche wird schneller von Makrobenthos bewachsen als Beton mit glatter Oberfläche.*

$H_{A3}$ : *Die Diversität der sich etablierenden Makrobenthos-Artengemeinschaft ist nach einer bestimmten Besiedlungszeit auf wasserdichtem Beton höher als auf nicht wasserdichtem Beton.*

$H_{A4}$ : *Die Diversität der sich etablierenden Makrobenthos-Artengemeinschaft ist nach einer bestimmten Besiedlungszeit auf Beton mit rauer Oberfläche höher als auf Beton mit glatter Oberfläche.*

Die Beschränkung auf die Untersuchung von Makrobenthos begründet sich auf der einfachen Erfassbarkeit dieser Organismengruppe.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Substrat

Als Substrat dienten flachzylindrischen Betonplatten ( $\varnothing$  28 cm, Höhe 6 cm), die mithilfe handelsüblicher Kuchen-Springformen gegossen wurden. Als Grundmischung wurde – wie auch für die Herstellung der Reef Balls – Baubeton verwendet.

Für jeden Versuchsansatz – eine Kombination der Oberflächeneigenschaften „wasserdicht/ wasserdurchlässig“ mit „rau/ glatt“ - wurden drei Parallelen angefertigt (Schema 1). Um Wasserdichtheit zu erreichen, wurde dem Beton Mikrosilica zugeschlagen. Das Aufrauen erfolgte durch Zugabe von Kieseln mit einem Durchmesser von ca. 0,5 cm, die anschließend mit einer dünnen Betonschicht überzogen wurden. Der Anteil der Kiesel am Gesamtgewicht der Platten betrug ca. 30 %.

**Schema 1: Oberflächeneigenschaften der Versuchsplatten**

Oberflächeneigenschaften			
	wasserdicht	wasserdurchlässig	
glatt	1, 2, 3	4, 5, 6	
rau	7, 8, 9	10, 11, 12	
		Plattennummern	



## 2.2 Untersuchungsort

Die Untersuchungen wurden im Flachwasser der Kieler Förde vor der Seebadeanstalt Holtenau durchgeführt (Abbildung 2). Am 04.06.2001 wurden die Versuchsplatten durch Taucher in einer Tiefe von ca. 3 m auf einer Rechtecksfläche gemäß Schema 2 im Abstand von ca. 1,5 m flach auf den Untergrund ausgebracht. Ihre Position innerhalb dieser Fläche war zuvor nach dem Zufallsprinzip bestimmt worden.

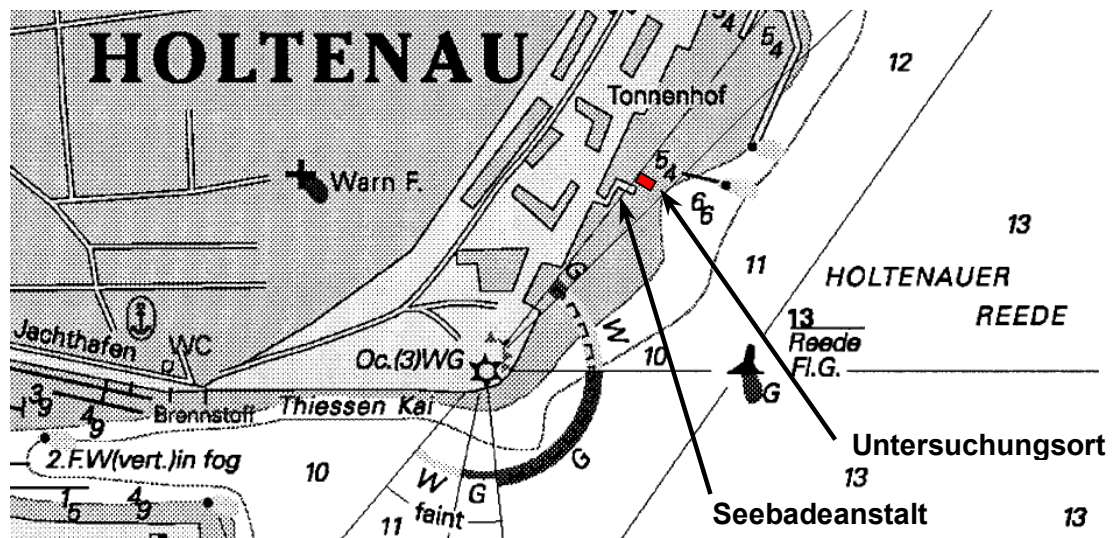
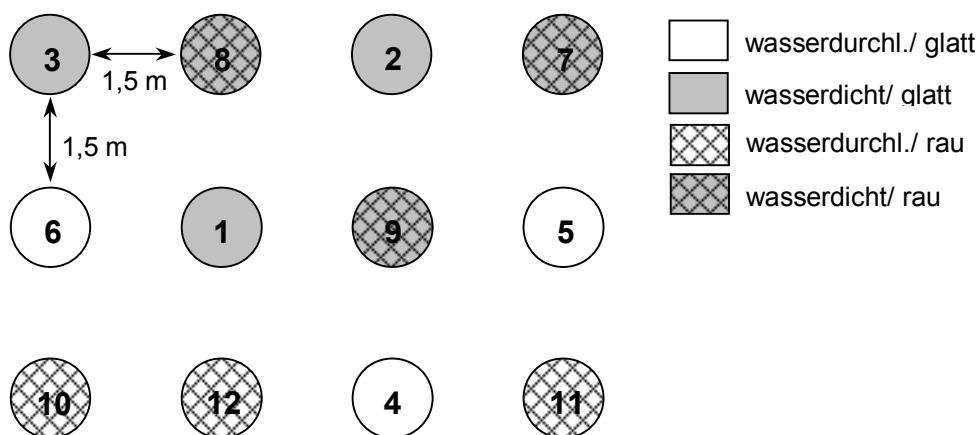


Abbildung 2: Ausschnitt der Kieler Förde bei Holtenau mit der alten Seebadeanstalt und dem Untersuchungsort (rotes Rechteck)

Schema 2: Anordnung der Versuchsplatten am Untersuchungsort (Nord-Süd-Ausrichtung, oberste Reihe = Norden)



Durch den nördlich vom Untersuchungsort gelegenen Tonnenhof wurde die typischerweise in die Förde gerichtete Bodenströmung abgeschirmt, weshalb der Standort strömungsberuhigt war.

An der Seebadeanstalt herrschte aufgrund der dort ansässigen Tauchschule reger Sporttauchbetrieb. Durch Hinweistafeln über Wasser sowie am Untersuchungsort unter Wasser waren die Sporttaucher angehalten, die unmittelbare Umgebung der Versuchsplatten zu meiden, um das Experiment nicht zu stören.

### **2.3 Ermittlung der Bewuchsgeschwindigkeit**

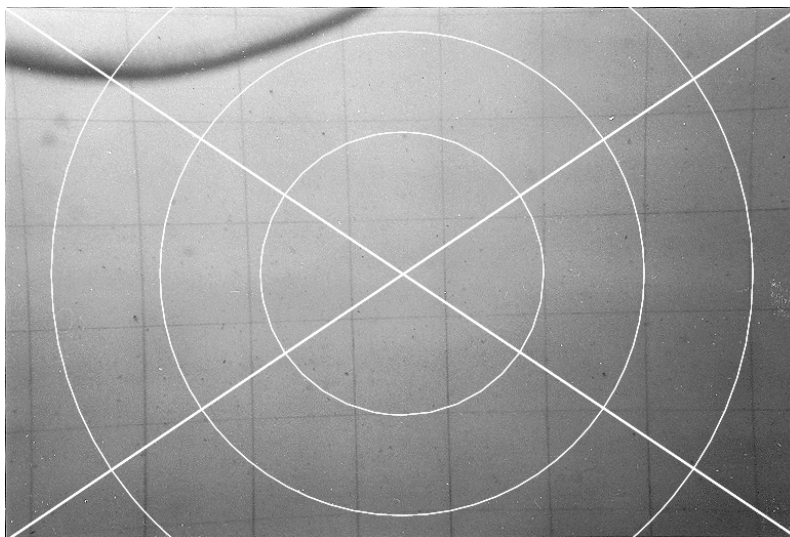
Für die Ermittlung der Bewuchsgeschwindigkeit kam ein fotooptisches Verfahren zum Einsatz. Hierzu wurde der zentrale Teil der Plattenoberseite über einen Zeitraum von sechs Wochen einmal wöchentlich mit einer Unterwasserkamera fotografiert (Nikonos V, 35 mm Nikkor-Objektiv, Makro-Aufsatzlinse, externes Blitzgerät Nikon SB 102 mit Diffuser). Für den notwendigen konstanten Abstand der Kamera von der Platte sorgte ein vor der Aufsatzlinse montierter Abstandhalter.

Bereits nach der ersten Woche wiesen die Versuchsplatten einen Belag aus Detritus auf. Da dieser den Bewuchs der Platten überdeckte, wurde er mit Fächerbewegungen der Hand entfernt, um klare Bilder von der Plattenoberfläche zu gewährleisten. Ein Verlust des fest mit der Platte assoziierten Aufwuchses war bei dieser Prozedur nicht zu beobachten. Die Vorgehensweise wurde wöchentlich wiederholt.

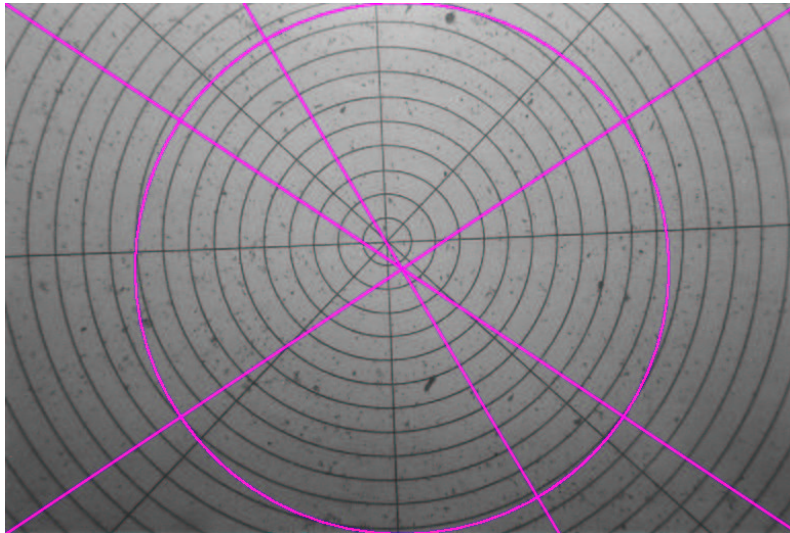
Die Digitalisierung der Fotos erfolgte einheitlich mit einer Auflösung von 150 *ppi* bei 24 Bit Farbtiefe. Die so erhaltenen Digitalkopien wurden in *Adobe Photoshop* auf 775 x 520 Pixel zugeschnitten und bei Bedarf nachbearbeitet, um die anschließende Analyse zu erleichtern. Mit dem Bildanalyseprogramm *SigmaScan* wurde der Anteil der bewachsenen Fläche an der Gesamtfläche bestimmt. Als Bewuchs wurden dabei Wohnröhren von Polychaeten und Gammariden, Gehäuse von Balaniden und die Oberfläche dicht bedeckenden Algen (*Enteromorpha spec.* und *Ceramium spec.*) gewertet. Nichtsessile Organismen sowie undeutliche Strukturen fanden keine Beachtung.

Um die Abbildungseigenschaften der Linsenoptik zu charakterisieren, wurden unter Wasser Testaufnahmen von einem regelmäßigen Gitter gemacht (Abbildung 3).

Hierbei stellte sich heraus, dass die Optik Objekte verkleinert darstellt und das Bild radial verzerrt ist. Die Verzerrung nimmt mit der Entfernung von der optischen Achse zu. Da dies bei der Analyse zu einer Überbewertung von Objektflächen in den Eckbereichen des Bildes geführt hätte, entwickelte der Autor eine Analysemethode, die dieses Problem umgeht: Hierfür wurde eine Kalibrierungsvorlage verwendet, die aus konzentrischen Kreisen besteht. Der Durchmesser jedes Kreises ist jeweils um 1 cm größer als der des nächstkleineren. Die Vorlage wurde abgelichtet und das erhaltene Bild (Abbildung 4) mit dem Original verglichen. Für eine Kreisfläche in der Bildmitte, deren Durchmesser der Bildhöhe (Querformat) entspricht, wurde geprüft, ob das Verhältnis Bildfläche:Originalfläche von einer gleichförmigen Verteilung abweicht. *Nullhypothese: Das Verhältnis Bildfläche:Originalfläche entspricht im gesamten betrachteten Bereich dem Mittelwert aller gemessenen Verhältniswerte.*



**Abbildung 3:** Testaufnahme einer regelmäßigen Gitterstruktur zur Charakterisierung der Abbildungseigenschaften der Kameraoptik. Im Randbereich sind deutliche Verzerrungen erkennbar. Nachträglich wurden Orientierungslinien (weiß) eingefügt.



**Abbildung 4: Bild der Kalibrierungsvorlage. Die zusätzlichen Geraden dienen als Messhilfen, der Kreis in der Bildmitte stellt die Begrenzung der zu vermessenden Bildfläche dar.**

Für die Flächenerfassung wurde folgende Formel angewandt:

$$\frac{A_B}{A_O} = \frac{r_{B2}^2 - r_{B1}^2}{r_{O2}^2 - r_{O1}^2},$$

$A_B$  = Bildfläche

$A_O$  = Originalfläche

$r_{B1}$  = Radius des kleineren von zwei benachbarten Kalibrierungskreisen im Bild

$r_{B2}$  = Radius des größeren von zwei benachbarten Kalibrierungskreisen im Bild

$r_{O1}$  = Radius des entsprechenden kleineren Kalibrierungskreises im Original

$r_{O2}$  = Radius des entsprechenden größeren Kalibrierungskreises im Original

Das gemessene Verhältnis wurde gegen  $\frac{r_{B1} + r_{B2}}{2}$  (durchschnittlicher Radius der Kalibrierungskreise im Bild) aufgetragen. Eine signifikante Abweichung des Verhältnisses Bildfläche:Originalfläche im betrachteten Bereich konnte im Rahmen der Messgenauigkeit nicht nachgewiesen werden (Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest,  $N = 42$ , Prüfgröße  $D = 0,0079 \ll$  Schranke für 5%-Signifikanzniveau = 0,2099), weshalb die Nullhypothese nicht abgelehnt wurde. Somit konnte für den zentralen Teil des Bildes ein konstanter Abbildungsfaktor von 0,649 (Mittelwert aller Messungen Bildfläche:Originalfläche) angenommen werden. Der zu vermessende zentrale Bildbereich hatte eine Fläche von ca.  $61 \text{ cm}^2$  (Durchmesser  $8,81 \text{ cm}$ ; Abbildung 4), was einer untersuchten Originalfläche von etwa  $94 \text{ cm}^2$  entsprach.

## 2.4 Charakterisierung der Artengemeinschaft

Am 21. Juli 2001 erfolgte die Bergung der Platten, wobei diesmal der unter 2.3 beschriebene Belag auf der Oberseite belassen wurde. Sie wurden hierzu unter Wasser in Plastiksäcke verpackt und an Land gebracht. Zur Gewichtsreduktion ließ man bis auf ca. 1 Liter das Wasser aus den Säcken ab und transportierte die Platten senkrecht aneinandergelehnt in das Labor. Zur Zwischenlagerung wurden die Säcke in wassergefüllte Plastikwannen gelegt und deren Inhalt mit Formalin versetzt, um Verwesungsprozessen vorzubeugen. Zur Konservierung des Bewuchses wurden die Betonplatten einzeln den Plastiksäcken entnommen und jeweils auf der Bewuchsseite mit einer weichen Bürste im Wasserbad gesäubert. Das Wasser wurde mit einem 500- $\mu$ m-Sieb filtriert. Die auf diese Weise gewonnenen Organismen des Makrobenthos konnten dann in 4-%igem Formalin dauerhaft konserviert werden.

Das Auszählen des Makrozoobenthos erfolgte unter dem Binokular. Bei sehr abundanten Organismen (z. B. *Mytilus edulis*) wurde ein Teil der Probe ausgezählt und von dieser Teilmenge auf die Gesamtzahl hochgerechnet. Nach Vorliegen der Artenliste wurde mit dem Programm *BioDiversity Pro* der Shannon-Index jeder Platte als Maß für Diversität der Artengemeinschaft berechnet.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Abiotische Faktoren

Abbildung 5 gibt die Umweltfaktoren Temperatur und Oberflächensalinität am Standort für den Zeitraum der Untersuchung wieder. Zusätzlich ist die Salinität in 1 m Tiefe bei Boknis Eck (Eckernförder Bucht) angegeben.

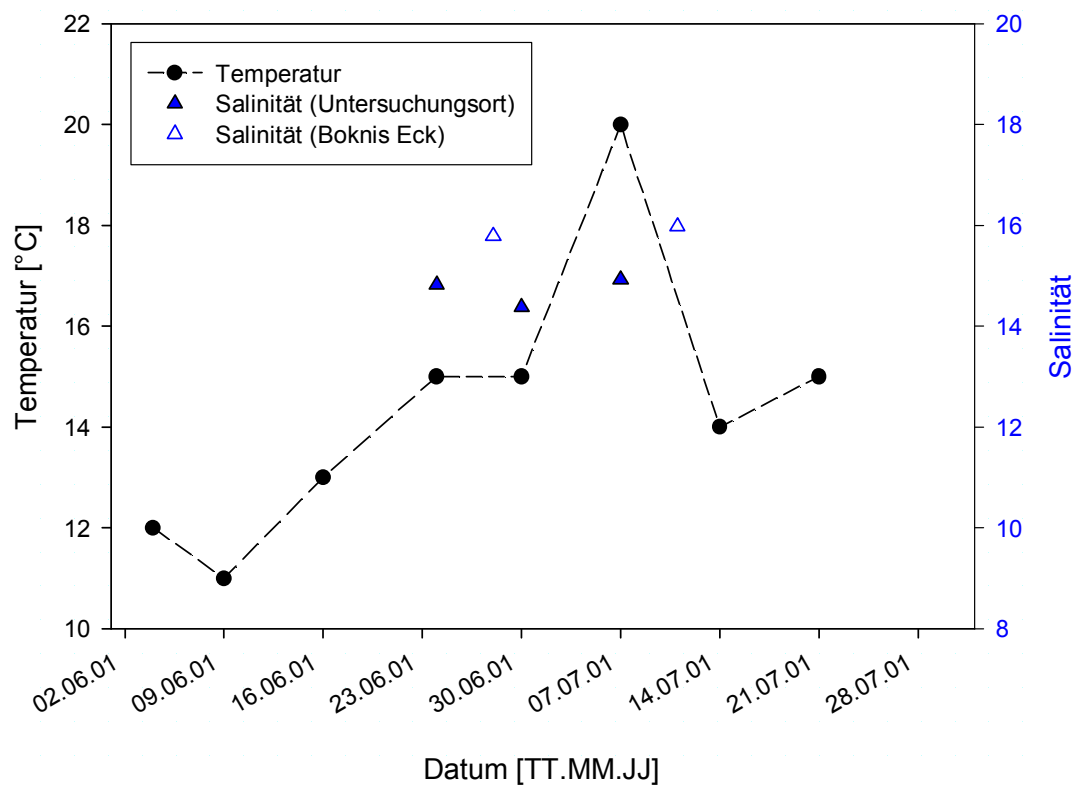
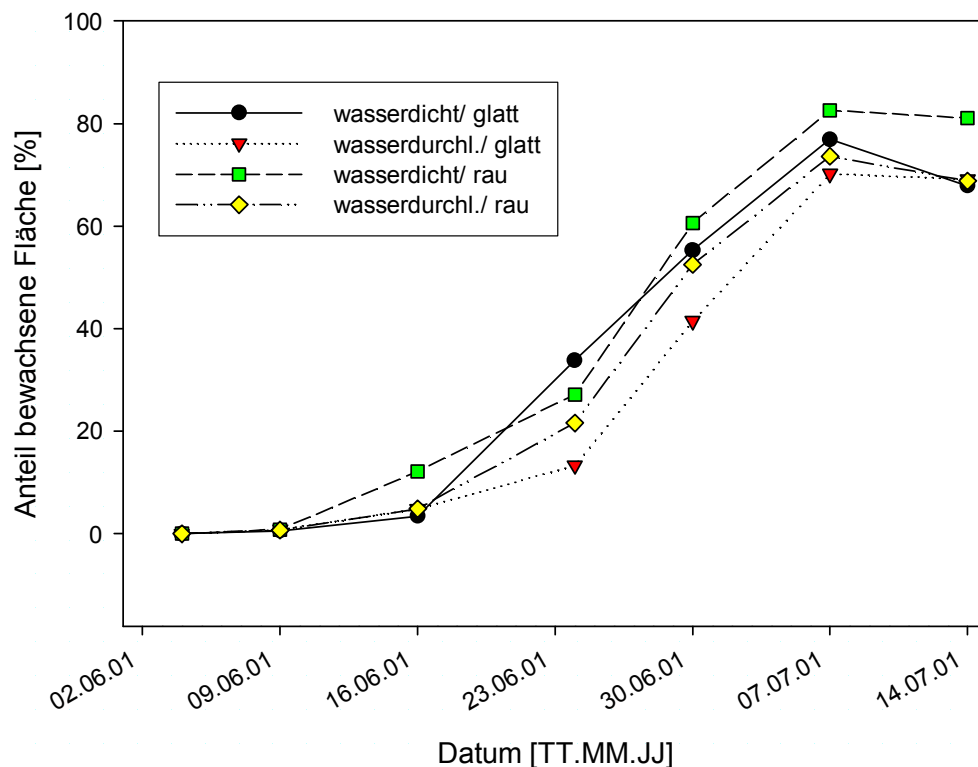


Abbildung 5: Temperatur und Salinität am Untersuchungsort; Salinität bei Boknis Eck (Eckernförder Bucht, Tiefe: 1 m)

#### 3.2 Bewuchsgeschwindigkeit

Die Anteile der bewachsenen Flächen von Parallelen des gleichen Versuchsansatzes wurden zusammengefasst und gemittelt. Abbildung 6 zeigt die Resultate im zeitlichen Verlauf. Die Bewuchsanalyse von Platte 3 (Versuchsansatz ‚wasserdicht/

glatt') fand keinen Eingang in die Berechnungen, da auf dieser Platte ein abnorm starkes Wachstum von *Enteromorpha spec.* zu verzeichnen war.



**Abbildung 6:** Zeitlicher Verlauf der mittleren Bewuchsdichte der vier Versuchsansätze. Der Übersichtlichkeit halber wurde auf die Darstellung von Fehlerindikatoren verzichtet.

Zwischen dem 07.07. und dem 14.07.01 war es offenbar zu einer Störung des Bewuchsprozesses gekommen, sodass die Daten vom 14.07.01 nicht in die weitere Analyse einfließen konnten. Die Daten vom 09.06. bis 07.07.01 wurden mit *SPSS* einer Zwei-Wege-Varianzanalyse mit Messwiederholung unterzogen (Tabelle 1). Zusätzlich wurde eine separate Zwei-Wege-Varianzanalyse für die Daten vom 07.07.01 durchgeführt, also für die fünfte Woche nach Beginn des Experiments (Tabelle 2).

**Tabelle 1: Ergebnisse der Zwei-Wege-Varianzanalyse mit Messwiederholung für die Daten der vier Versuchsansätze über den Zeitraum vom 09.06. bis 07.07.01**

Transformierte Variable: Mittel					
Quelle	Quadratsumme vom Typ I	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Intercept	55094,738	1,000	55094,738	220,946	0,000
Wasserdichtigkeit	705,300	1,000	705,300	2,828	0,136
Oberflächenstruktur	185,059	1,000	185,059	0,742	0,418
Wasserdicht. * Oberflächenstr.	12,084	1,000	12,084	0,048	0,832
Fehler	1745,505	7,000	249,358		

**Tabelle 2: Ergebnisse der Zwei-Wege-Varianzanalyse für die Daten der vier Versuchsansätze vom 07.07.01**

Abhängige Variable: Woche 5					
Quelle	Quadratsumme vom Typ I	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Modell	63310,243	4,000	15827,561	83,537	0,000
Wasserdichtigkeit	63254,059	2,000	31627,030	166,926	0,000
Oberflächenstruktur	52,952	1,000	52,952	0,279	0,613
Wasserdicht. * Oberflächenstr.	3,232	1,000	3,232	0,017	0,900
Fehler	1326,272	7,000	189,467		
Gesamt	64636,515	11,000			

Da die Arbeitshypothesen einseitig formuliert sind, die Varianzanalyse jedoch ein zweiseitiges Testverfahren ist, müssen die erhaltenen Irrtumswahrscheinlichkeiten in Tabelle 1 und 2 (Spalte „Signifikanz“) halbiert werden, sodass sich die in Tabelle 3 dargestellten Werte ergeben.

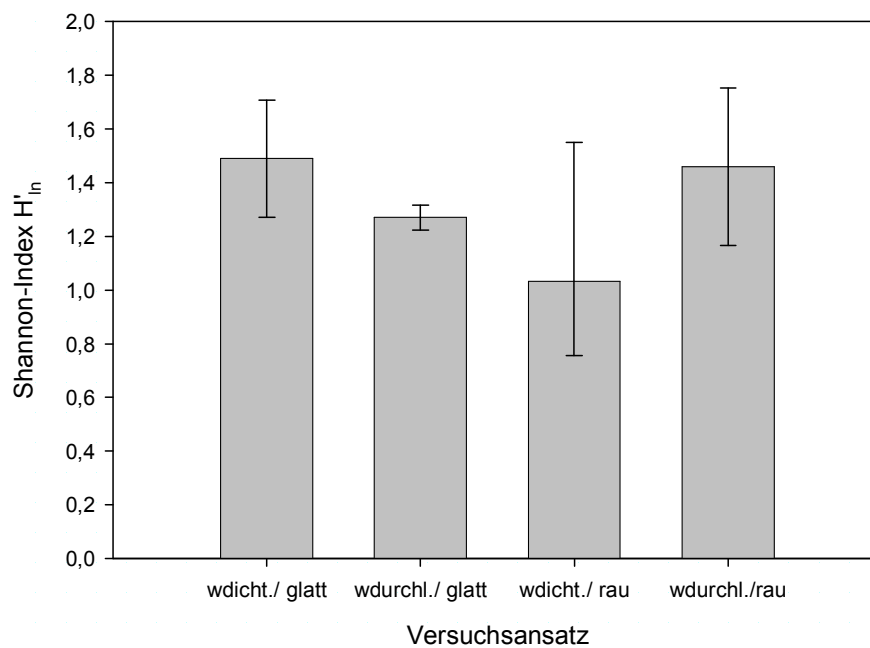
**Tabelle 3: Korrigierte Irrtumswahrscheinlichkeiten für die Varianzanalysen der Bewuchsgeschwindigkeit**

positive Einflussnahme auf Bewuchsgeschwindigkeit durch...	Irrtumswahrscheinlichkeit (p)	
	Zeitreihe	fünfte Woche
Wasserdichtigkeit	0,068	< 0,000
Oberflächenstruktur	0,209	0,307



### 3.3 Artengemeinschaft

Die auf Basis des natürlichen Logarithmus berechneten Shannon-Indizes ( $H'_{ln}$ ) von Parallelen des gleichen Versuchsansatzes wurden zusammengefasst und medianisiert (Abbildung 7). Die Berechnungen wurden an einer reduzierten Artenliste durchgeführt. Diese Liste enthält nur jene Organismen, die auf mindestens zwei Versuchsplatten gefunden wurden (s. Artenliste im Anhang).



**Abbildung 7: Medianisierte Shannon-Indizes ( $H'_{ln}$ ) der vier Versuchsansätze; Fehlerindikatoren: Minimum und Maximum**

Die Werte der Platten 5 (Versuchsansatz ‚wasserdurchlässig/ glatt‘) und 12 (Versuchsansatz ‚wasserdurchlässig/ rau‘) gingen nicht in die Berechnungen ein, da bei der Behandlung dieser beiden Platten Fehler unterlaufen waren. Auch der Shannon-Index von Platte 3 wurde aus dem in 3.1 genannten Grund nicht berücksichtigt.

### 3.4 Randbeobachtungen

Fünf bis sechs Wochen nach Ausbringung der Bewuchsplatten hatte sich an diesen eine deutlich erkennbare benthische und suprabenthische Fauna etabliert. Schwarzgrundeln (*Gobius niger*) hatten den Beton teilweise unterhöhlt, was auch Unterschlupfmöglichkeiten für Butterfische (*Pholis gunellus*) bot. Zu jenen Organismen, die nicht fest mit dem Substrat assoziiert waren, sich jedoch in unmittelbarer Umgebung aufhielten, zählten Schwebegarnelen (Mysidacea), Schwimmgundeln (*Coryphopterus flavescens*), Seesterne (*Asterias rubens*), Strandkrabben (*Carcinus maenas*) und verschiedene Schnecken (*Littorina litorea*, *Elysia viridis*). Diese Arten wurden bei der Diversitäts-Analyse nicht berücksichtigt, da sie sehr vagil sind und daher in stets wechselnder Zahl auf dem Versuchssubstrat anzutreffen waren (Ausnahme: juvenile *Asterias rubens*). Zu allen Untersuchungszeitpunkten waren deutliche Fraßspuren von *Littorina litorea* auf den Platten zu erkennen.

## 4 Diskussion

### 4.1 Abiotische Faktoren

Die Oberflächensalinität war während des Untersuchungszeitraumes weitgehend konstant. Werte und Konstanz (Abbildung 5) konnten aufgrund der thermischen Schichtung auch für die geringe Tiefe des Standortes angenommen werden, da die Thermokline tiefer als 3 m lag. Im Vergleich zur offenen Kieler Bucht (siehe Werte von Boknis Eck) war die Salinität am Untersuchungsort um etwa eine Salinitätseinheit erniedrigt, was auf den nahen Nordostseekanal zurückzuführen ist. Ein Einfluss dieser Erniedrigung auf den Bewuchsvorgang war jedoch nicht zu erwarten, da die in diesem Teil der Ostsee vorkommenden Organismen auch weit größere Salzgehaltsschwankungen sehr gut tolerieren.

Anfang Juni betrug die Wassertemperatur 11-12 °C; bis Anfang Juli stieg diese auf 20 °C, fiel jedoch Mitte Juli wieder deutlich auf teilweise unter 15 °C ab. Die starken Temperaturschwankungen während der ersten beiden Juliwochen sind eine mögliche Erklärung für die Störung der bis dahin monoton steigenden Besiedlungsdichte (Abbildung 6).

### 4.2 Bewuchsgeschwindigkeit

Unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufs ist die Irrtumswahrscheinlichkeit für die Annahme eines fördernden Einflusses von wasserdichtem Beton auf den Bewuchsvorgang  $p = 6,8 \%$ . In Anbetracht der geringen Zahl von Parallelen ist dieses Ergebnis als zufriedenstellend zu bewerten. Bei Betrachtung der Bewuchswerte lediglich der fünften Untersuchungswoche ist dieser Einfluss sogar hochsignifikant ( $p < 0,0 \%$ ). Im Zeitraum vom 16.06.01 bis 07.07.01 (zweite bis fünfte Woche) betrug die maximale Differenz des Anteils der bewachsenen Fläche zwischen wasserdichtem und wasserdurchlässigem Substrat im Durchschnitt 15,16 Prozentpunkte.

Demgegenüber lässt die Varianzanalyse in keinem Fall einen positiven Einfluss einer aufgerauten Oberfläche auf die Bewuchsgeschwindigkeit erkennen ( $p = 20,9 \%$  für Zeitreihe,  $p = 30,7 \%$  für Daten der fünften Woche).

Der Autor ist sich dessen bewusst, dass vor Durchführung einer Varianzanalyse die Daten auf Normalverteilung geprüft werden sollen. Abgesehen davon, dass diese Prüfung bei drei Parallelen pro Versuchsansatz nicht möglich ist, wird darauf verwiesen, dass die Varianzanalyse sehr robust gegen nicht-normalverteilte Daten ist.

### **4.3 Artengemeinschaft**

Nach den Arbeitshypothesen  $H_{A3}$  und  $H_{A4}$  sollte die Diversität auf den wasserdichten bzw. rauen Platten höher sein als auf den wasserdurchlässigen bzw. glatten Platten. Aus Abbildung 7 lässt sich jedoch kein Einfluss der Oberflächeneigenschaften des Betons auf die Diversität der Artengemeinschaft ablesen. Die Variabilität zwischen den Versuchsansätzen sowie innerhalb der Parallelen ist sehr hoch. Allgemein dominierten typische Erstbesiedler wie *Polydora spec.*, Amphipoden und Nematoden sowie *Mytilus edulis*, deren Larvenfall in den Untersuchungszeitraum fiel.

### **4.4 Randbeobachtungen**

Auch wenn die beschriebenen Begleitentwicklungen an den Bewuchsplatten keinen Beitrag zur Beantwortung der Fragestellung liefern können, machen sie doch den hohen ökologischen Wert künstlichen Hartsubstrates deutlich. Der Beton diente nicht nur als Grundlage für den Aufwuchs von Kleinf fauna und Algen, sondern bot auch höhlenbauenden und –bewohnenden Grundfischen ein Refugium. Im Zuge der Besiedlung fungierte das Hartsubstrat auch als Nahrungsquelle für Grazer und Räuber.

### **4.5 Fazit**

Mit den durchgeführten Experimenten konnte gezeigt werden, dass die durch Zugabe von Mikrosilica erzielte Wasserdichtigkeit des Betons einen deutlichen positiven Einfluss auf die Geschwindigkeit der Erstbesiedlung durch Makrobenthos hat. In diesem Sinne wird Arbeitshypothese  $H_{A1}$  angenommen.

Demgegenüber war kein signifikanter Einfluss der Oberflächenstruktur des Betonsubstrates auf die Besiedlungsgeschwindigkeit nachweisbar. Arbeitshypothese  $H_{A2}$  wird daher verworfen.

Untersuchungen der Artenzusammensetzung ließen keine Auswirkungen der Oberflächenbeschaffenheit auf die Diversität erkennen. Die Arbeitshypothesen  $H_{A3}$  und  $H_{A4}$  sind daher ebenfalls zu verwerfen.

## **4.6 Fehlerquellen und Methodenkritik**

Da der Untersuchungsort für das Reef-Ball-Projekt aufgrund gesetzlicher Bestimmungen nicht frei gewählt werden konnte (es bedurfte einer behördlichen Genehmigung), mussten gewisse Einschränkungen bzgl. der Eignung des Standortes hingenommen werden. Hierzu zählte vor allem das von den Verhältnissen in der übrigen Förde abweichende Strömungsregime (s. 2.2). Durch die herabgesetzte Strömungsgeschwindigkeit wurde das Ausfallen von Detritus gegenüber strömungs-exponierten Regionen erleichtert (s. 2.3). In diesem Zusammenhang muss auch davon ausgegangen werden, dass das Entfernen des Detritusbelages das Ergebnis beeinflusst haben kann – wenngleich diese Vorgehensweise für die Datengewinnung notwendig war. Eine senkrechte Anbringung der Versuchsplatten wäre hier sicher vorteilhafter gewesen, hätte aber eines größeren materiellen Aufwands bedurft.

Einen weiteren potentiellen Störfaktor stellten die Sporttauchaktivitäten in der Umgebung des Standortes dar. Trotz der Hinweistafeln konnte nicht restlos ausgeschlossen werden, dass eine Störung des Bewuchsvorganges – versehentlich oder absichtlich – durch Berührung der Plattenoberfläche oder Aufwirbeln von Sediment erfolgt war.

Es bedurfte einiger Übung des Autors, bis mit der Unterwasserkamera Bilder von guter Qualität entstanden. Durch die Verwendung nur eines Blitzes waren die Fotos ungleichmäßig ausgeleuchtet, weshalb sich die Bildauswertung schwierig gestaltete.

Bergung, Transport, Zwischenlagerung und Reinigung der Bewuchsplatten am Ende der Inkubationszeit müssen als große Fehlerquelle bewertet werden, da hierbei viele Organismen verloren gehen oder zerstört werden konnten. Vor allem der Bergungsvorgang dürfte die Integrität der Artengemeinschaft empfindlich gestört

haben. Beim Säubern der Platten konnten auch Organismen vom Rand und der Unterseite der Betonplatten abgerieben werden und so das Ergebnis verfälschen. Die Verwendung eines Venturi-Saugers direkt am Untersuchungsort hätte hier Abhilfe schaffen können.

Zu bemängeln ist ferner die geringe Zahl von Parallelen für jeden Versuchsansatz, die sich durch unvorhergesehene Zwischenfälle weiter verringerte, wodurch auch der Umfang des Datenmaterials reduziert wurde. Hier wird jedoch auf den eingangs erwähnten Vorversuchscharakter dieser Arbeit verwiesen. Mehr als zwölf Proben hätten in der zur Verfügung stehenden Zeit nicht bearbeitet werden können.

Der notgedrungen begrenzte zeitliche Rahmen wird dem komplexen Vorgang der Substratbesiedlung nur sehr bedingt gerecht. Organismen, deren Verbreitungsphase nicht mit dem Untersuchungszeitraum zusammenfiel, blieben bei der Untersuchung zwangsläufig unberücksichtigt.

## Anhang

Artenliste; grau = nicht zur Berechnung des Shannon-Index herangezogen

Gruppe	Art	Platte 1	Platte 2	Platte 4	Platte 6	Platte 7	Platte 8	Platte 9	Platte 10	Platte 12
Polychaeta	Polydora spec.	705	550	1.720	1.105	1.410	1.040	680	900	1.080
	Harmothoe imbricata	15	12	16	11	21	14	11	3	17
	Eulalia bilineata	1	0	0	1	0	0	0	0	0
	Pygospio spec.	0	1	3	1	1	4	3	5	32
	Phyllodoce maculata	0	0	0	3	1	2	0	2	7
Nemertina	Nemertina spec.	1	2	3	4	1	2	4	7	5
Nematoda	Nematoda spec.	470	330	1.130	160	505	290	670	275	453
Amphipoda	Corophium insidiosum	100	100	94	118	249	98	143	90	346
	Microdeutopus gryllothalpa	557	753	1.083	434	1.032	898	1.308	319	1.358
	Phtisica marina	12	26	32	5	29	7	4	0	3
	Melita palmata	0	0	4	1	4	2	2	3	4
	Isaeidae spec.	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Cirripedia	Balanus crenatus	50	48	90	77	94	67	51	279	170
Mysidacea	Praunus spec.	1	0	0	0	2	0	0	0	0
Isopoda	Idotea baltica	1	0	7	0	1	3	1	2	1
Cumacea	Diastylis rathkei	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Bivalvia	Mytilus edulis (juv.)	3.480	820	6.780	3.425	17.560	4.520	8.760	1.100	8.680
	Mya arenaria	0	2	83	10	111	265	113	23	54
	Cardium spec.	1	7	50	7	27	65	53	19	30
Prosobranchia	Hydrobia spec.	14	20	22	47	8	9	10	24	46
	Bittium reticulatum	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	Retusa trunculata	0	0	0	0	0	0	0	0	3
Asteroidea	Asterias rubens (juv.)	163	62	193	90	203	240	160	105	205
Osteichthyes	Osteichthyes spec. (larval)	3	1	23	0	9	785	28	0	36
Summe		5.575	2.735	11.333	5.499	21.268	8.311	12.001	3.157	12.532